OE2011/OE2021

DSP Lock-In Amplifier

用户使用手册

Copyright © 2024 by SSI.
All Rights Reserved.

Revision 1.0.2, 2025-02-06

目录

1. 技术参数 1
1.1 信号通道 1
1.2 参考通道 1
1.3 解调器 2
1.4 内部振荡器与输出 2
1.5 显示 3
1.6 辅助输入输出 3
1.7 通讯接口 4
1.8 其他 4
2. 锁相放大器基础 6
2.1 锁相放大器介绍 6
2.2 OE2011/OE2021 功能原理图 8
2.3 参考通道 9
2.4 相敏检波器 9
2.5 滤波器、时间常数和直流增益 10
2.6 通道输出和增益 13
2.7 动态储备 14
2.8 信号输入放大和滤波 15
2.9 输入端连接 16
2.10 固有噪声 17
2.11 外部噪声源 19
2.12 噪声测量 21
2.13 辅助模拟输入/输出（AUX IN/OUT） 21
2.14 信号发生器 21
2.15 多谐波测量 22
3. 界面介绍 23
3.1 前面板 23
3.1.1 显示屏 23
3.1.2 软键 23
3.1.3 旋钮 23
3.1.4 键盘 23
3.1.5 BNC 连接器 24
3.2 后面板 24
3.2.1 电源接口 24
3.2.2 USB2.0 25
3.2.3 RS232 25
3.2.4 以太网接口 25
3.2.5 AUX IN 25
3.2.6 AUX OUT 25
3.2.7 CLK IN 25
3.2.8 CLK OUT 25
3.2.9 SYNC IN & SYNC OUT 25

3.2.10 MONITOR OUT 25
3.3 主界面 26
3.3.1 状态栏 26
3.3.2 数据栏 27
3.3.3 监测栏 27
3.3.4 功能栏 28
4. 上位机介绍 29
4.1 上位机概述 29
4.2 连接上位机 30
4.3 软件使用范例 31
5. 界面与上位机功能 36
5.1 [SIGNAL INPUT]子菜单 36
5.1.1 前面板界面配置 36
5.1.2 上位机配置 37
5.2 [OSC REF]子菜单 38
5.2.1 前面板界面配置 38
5.2.2 上位机配置 40
5.3 [DEMOD FILTER]子菜单 41
5.3.1 前面板界面配置 41
5.3.2 上位机配置 43
5.4 [DEMOD REF] 子菜单 44
5.4.1 前面板界面配置 44
5.4.2 上位机配置 47
5.5 [DISPLAY] 子菜单 47
5.5.1 前面板界面配置 47
5.5.2 上位机配置 49
5.6 [SIGNAL OUTPUT] 子菜单 50
5.6.1 前面板界面配置 50
5.6.2 上位机配置 52
5.7 [AUTO SET]子菜单 53
5.7.1 前面板界面配置 53
5.7.2 上位机配置 53
5.8 [CHANNEL OUTPUT]子菜单 54
5.8.1 前面板界面配置 54
5.8.2 上位机配置 56
5.9 [SYSTEM]子菜单 57
5.9.1 前面板界面配置 57
5.10 [AUX OUTPUT] 子菜单 63
5.10.1 前面板界面配置 63
5.10.2 上位机配置 64
5.11 上位机数据保存 64
6. 远程编程 65
6.1 OE2011/OE2021 命令语法 65
6.2 详细的命令列表 66

6.2.1 输入通道配置指令 67
6.2.2 振荡器配置指令 68
6.2.3 解调器配置指令 70
6.2.4 信号输出通道配置指令....73
6.2.5 Channel 通道输出指令 75
6.2.6 辅助输出指令 77
6.2.7 自动设置指令 78
6.2.8 保存读取设置指令 79
6.2.9 复位与 IDN 指令 80
6.2.10 数据和状态读取指令....81
7. 性能测试 84
7.1 启动测试....86
7.2 直流偏置....86
7.3 共模抑制....87
7.4 幅值精度与平坦度 87
7.5 幅值线性度....88
7.6 频率精度....89
7.7 Sine Out 幅值相位的精度与平坦度 90
7.8 直流输出和输入 91
7.9 输入噪声....92
7.10 性能测试记录表....93
8. 操作实例 97
8.1 基本信号测量....97
8.2 谐波测量....100
8.3 AM 解调测量 103
8.4 某任意光源光谱测量 104
8.5 串口通讯....107

1. 技术参数

1.1 信号通道

- 输入模式
  - 电压 单端(A)或差分(A-B)输入
  - 电流 单端信号（跨阻输入）
- 满量程灵敏度 1 nV 至 5 Vrms
- 电流跨阻增益电阻 1 kΩ，1 MΩ，100 MΩ 三个挡位
- 输入阻抗
  - 电压 10 MΩ//25 pF
  - 电流 100 Ω 或 1 kΩ
- 输入耦合 交流耦合（截止频率 0.16Hz），直流耦合
- 输入屏蔽接地 BNC (A, B)屏蔽层可直接接地，或者通过 10kΩ 电阻接入浮地
- 共模抑制比 >110 dB 至 1 kHz，以 6 dB/oct 衰减
- 动态储备 >130 dB
- 增益精度 典型 0.5%，最大 1%
- 电压噪声
  - 997 Hz 时 3.3 nV/ √ Hz（Typ）
  - 10kHz 时 3.0 nV/ √ Hz（Typ）
  - 100kHz 时 2.5 nV/ √ Hz（Typ）
  - 1MHz 时 2.5 nV/ √ Hz（Typ）
- 电流噪声
  - 97 Hz 时 20 fA/ √ Hz（Typ）
  - 997Hz 时 45 fA/ √ Hz（Typ）

1.2 参考通道

- 输入
  - 通道数 2
  - 频率范围 10 μHz 至 250 kHz（OE2011）
    10 μHz 至 1.5 MHz（OE2021）
  - 支持输入波形 方波或正弦波
  - 输入阻抗 1 MΩ
  - 方波参考电平 3 V< V_{IH} <5 V，-0.1 V< V_{IL} <0.5 V
  - 正弦参考信号 频率>1 Hz
    300 mV < Vpp < 10 V
- 相位
  - 分辨率 1 μ°
  - 相位误差 典型 0.5°，最大 2°

温漂	<200 ppm/℃
• 谐波检测	1~10000 (OE2011: nF < 250 kHz; OE2021: nF < 1.5 MHz)
• 采集时间	
内部参考	即时采集
外部参考	100 个信号周期(>1 kHz)或者 10 个信号周期(<1 kHz)

1.3 解调器

• 解调器数量	8
• 解调器位数	64 bit
• 稳定性	
数字输出	所有设置均无零点漂移
显示	所有设置均无零点漂移
模拟输出	小于 200 ppm/℃
• 滤波器带宽	50 µHz 至 1.6 MHz
• 滤波器时间常数	100 ns 至 3 ks
• 滤波器陡降	6, 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48 dB/oct 陡降可选
• 同步滤波器	频率低于 10000 Hz 且陡降大于 18 dB/oct 有效

1.4 内部振荡器与输出

• 内部振荡器	
数量	2
精度	0.3 ppm
温度稳定性	0.5 ppm/℃
老化率	<1 ppm/year
相位噪声	-145 dBc/Hz (@1kHz)
• 输出频率	
范围	DC 至 250 kHz（OE2011）
	DC 至 1.5 MHz（OE2021）
精度	2 ppm + 1 µHz
分辨率	1 nHz
• 波形失真	-80 dBFS (f<100 kHz)，-60 dBFS (f>1 MHz)
• 正弦幅值	0.1 µVrms 至 5 Vrms
精度	典型 0.5% (f<100 kHz)，最大 2%
分辨率	0.1 µVrms
驱动能力	± 80 mA max
温度稳定性	<200 ppm/℃
输出阻抗	50 Ω
• 可调直流偏置	-5 V_{DC} 至 5 V_{DC}
• 同步输出	3.3V TTL/CMOS 电平，输出阻抗 50 Ω
• 额外功能	AM/FM/PM 信号调制输出

1.5 显示

- 屏幕 5.6 英寸，640×480 的 TFT 彩色液晶屏
  - 屏幕格式 单通道或双通道显示
  - 显示值 每个通道均可显示 X,Y,R,θ 值
  - 显示类型 数字显示图
  - 颜色风格 黄色，绿色

1.6 辅助输入输出

- AUX Inputs
  - 功能 4 通道输入
  - 幅值 ±10 V，0.1 mV 分辨率，0.1%+20mV 精度
  - 阻抗 1 MΩ
  - 采样率 150 kSa/s
- AUX Outputs
  - 功能 4 通道输出
  - 幅值 ±10 V，0.1 mV 分辨率，0.1%+20mV 精度
  - 驱动电流 ±30mA max
  - 输出速率 500 kSa/s
- CH Outputs
  - 功能 2 通道输出
  - 幅值 ±10 V，0.1 mV 分辨率，0.1%+20mV 精度
  - 驱动电流 ±30mA max
  - 输出速率 1 MSa/s
- Clock Input
  - 功能 外部 10 MHz 时钟输入接口
  - 电平 3.3V TTL/CMOS
- Clock Output
  - 功能 10 MHz 时钟输出接口
  - 电平 3.3V TTL/CMOS
- Trigger Input
  - 功能 锁相放大器的触发信号输入接口
  - 电平 3.3V TTL/CMOS
- Trigger Output
  - 功能 提供给其他锁相放大器的触发信号输出接口
  - 电平 3.3V TTL/CMOS
- Monitor Output
  - 功能 模拟链路的 ADC 前镜像信号输出
  - 驱动电流 ±40mA max

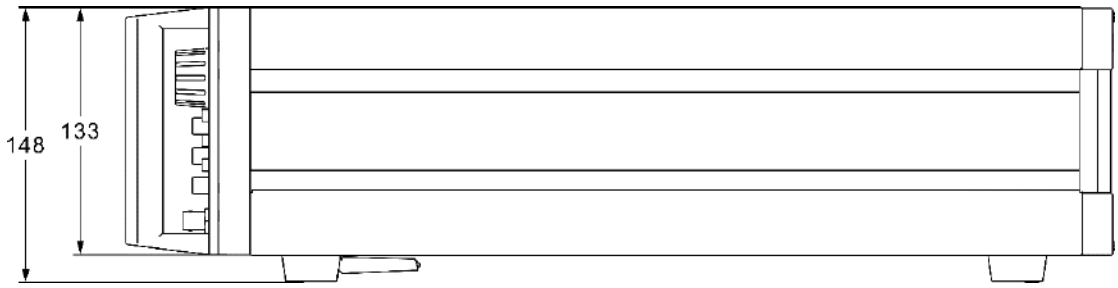
1.7 通讯接口

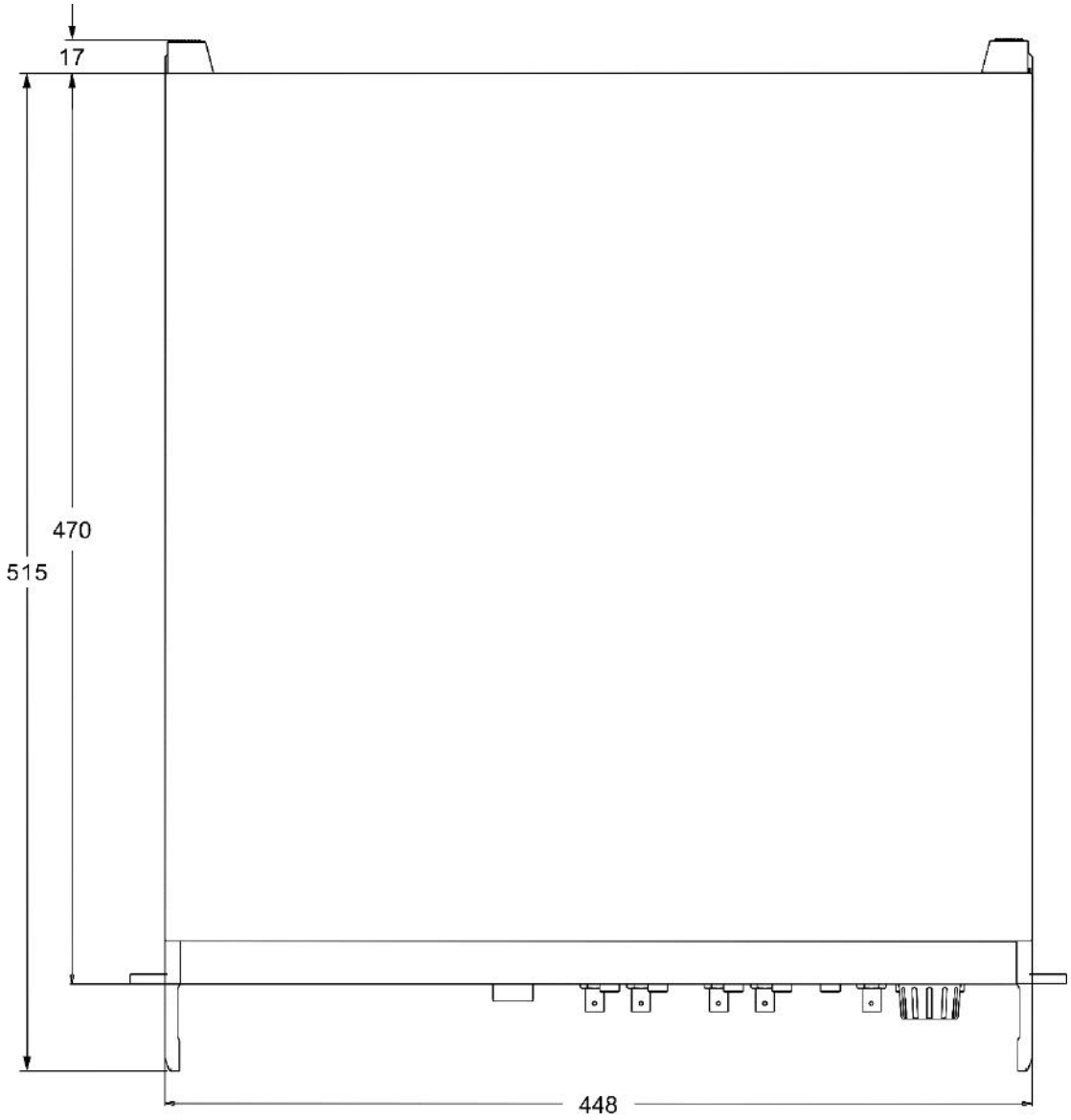
- RS-232 标准 9 针 RS-232 母插座
- USB2.0 USB2.0 高速接口
- Enternet RJ45-1000Mbps 有线接口
  WIFI 2.4GHz 无线网络接口
- GPIB IEEE-488.2 接口

1.8 其他

- 电源要求
  - 电压 220~240 V AC (110~120 VAC 可选)
  - 频率 50 Hz / 60 Hz
  - 功率 典型 50W，最大不超过 70 W
- 电源噪声抑制 70dB@1MHz
- 重量 12 KG
- 尺寸
  - 宽 448 mm
  - 深
    - 包括提手 532 mm
    - 不包括提手 470 mm
  - 高
    - 包括支脚 148 mm
    - 不包括支脚 133 mm

- 产品尺寸图




17
470
515
448

2. 锁相放大器基础

2.1 锁相放大器介绍

锁相放大器是用于微弱信号检测的装置，微弱信号常淹没在各种噪声中，锁相放大器可以将微弱信号从噪声中提取出来并对其进行准确测量，如图 1 所示。锁相放大器是基于互相干方法的微弱信号检测手段，其核心是相敏检测技术（Phase-Sensitive Detection），利用与待测信号有相同频率和固定相位关系的参考信号作为基准，提取出与参考信号有关的信号分量，过滤掉参考频率以外的噪声分量。

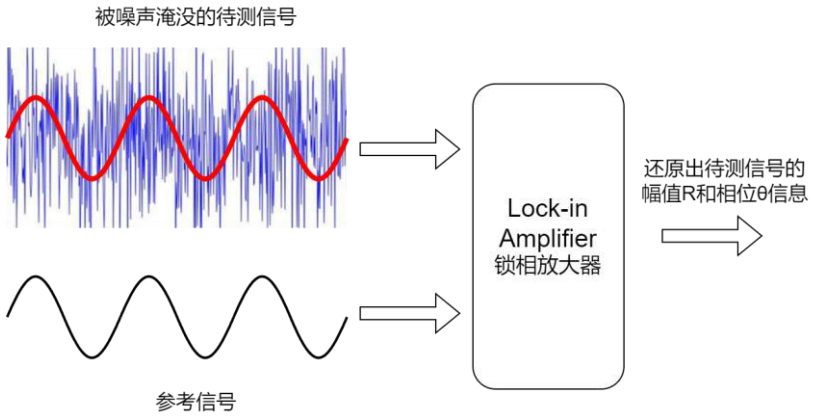


图1. 锁相放大器示意图

对微弱信号的最基本处理是放大，传统的放大处理在放大信号的同时，也放大了噪声，而且在不进行带宽限制或滤波处理的情况下，任何放大操作都将使得信号信噪比下降。因此，必须采用滤波手段提纯信号，提高信噪比，以实现对微弱信号的准确测量。但要实现中心频率可调而且稳定、高 Q 值的带通滤波器，往往十分困难。

相敏检测器（PSD）可以取代高 Q 值的带通滤波器，其基本模块包含一个将输入信号与参考信号相乘的乘法模块和一个对相乘结果进行低通滤波的滤波器模块。有时 PSD 也特指乘法模块，不包含滤波器模块。如图 2 所示。

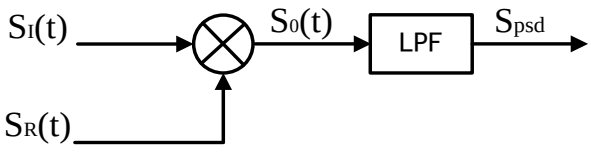


图2. 相敏检测示意图

$S_I(t)$是掺杂了噪声的时域输入信号，$S_R(t)$ 为与输入待测信号有相同频率关系的参考信号。PSD 结合待测信号通道和参考信号通道，即可以形成一路完整的锁相放大器功能架构，称为单相型锁相放大器。其结构原理图如图 3 所示。

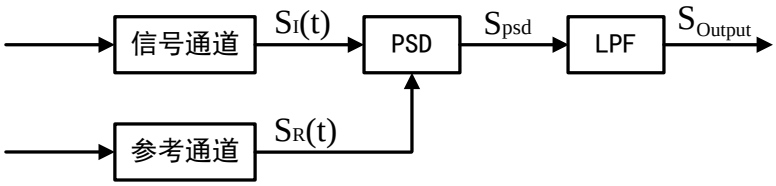


图3. 单相型锁相放大器结构图

从信号通道进入 PSD 模块的信号可定义为：

$$S_I(t) = A_I\, sin(\omega t + \varphi) + \mathrm{B(t)}$$

其中ω是待测信号的频率，$A_I\, sin(\omega t + \varphi)$是待测信号，$\mathrm{B(t)}$是掺杂的噪声。

参考信号通道输出的标准参考信号可定义为：

$$S_R(t) = A_R\, sin(\omega t + \delta)$$

两路信号同时输入 PSD 模块进行乘法操作，得到的输出为：

$$S_{\mathrm{psd}} = S_I(t)S_R(t) = A_I A_R\, sin(\omega t + \varphi)\, sin(\omega t + \delta) + \mathrm{B(t)}A_R\, sin(\omega t + \delta)$$

$$= \frac{1}{2}A_I A_R \cos(\varphi - \delta) - \frac{1}{2}A_I A_R\, cos(\,2\omega t + \varphi + \delta) + \mathrm{B(t)}A_R\, sin(\omega t + \delta)$$

上式结果有三部分，其中第一部分包含待测信号幅值A_I、参考信号幅值A_R以及输入信号相对于参考信号的相位差$(\varphi - \delta)$的余弦值，在输入信号有用部分与参考信号均稳定的情况下，可以认为该部分为一定值，即直流信号；同理，第二部分为原参考信号二倍频交流信号；而第三部分为噪声信号与参考信号的相乘，根据正弦信号的完备性可知，随机信号与其不具有相关性，其积分结果为零。

另一方面，从频谱来看，第一部分结果处于直流部分，第二部分在参考信号二倍频点，第三部分为原随机信号经过ω频谱搬移，以白噪声为例，搬移结果仍为白噪声。因此，将结果输入低通滤波器可以得到其直流部分如下：

$$S_{\mathrm{Output}} = \frac{1}{2}A_I A_R \cos(\varphi - \delta)$$

从频域上观察锁相放大器的频谱搬移过程如下图所示：

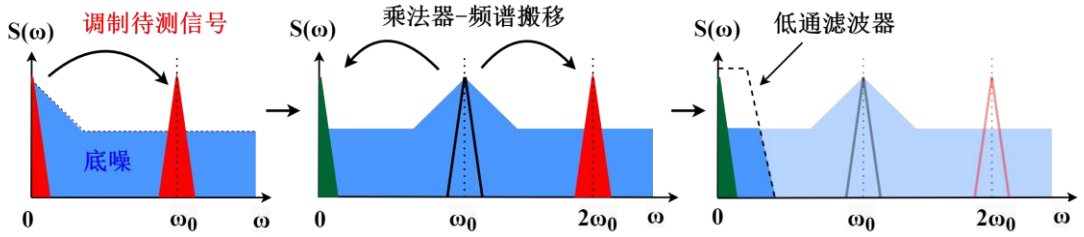


图4. 锁相放大器频谱搬移过程

通过调整待测信号与参考信号的相位差$(\varphi - \delta)$就能确定待测信号的幅值，但是这个调整的精度是很难保证的。双相锁相放大器的产生很好的解决了这个问题。如图 5 所示是双相锁相放大器的原理架构图。

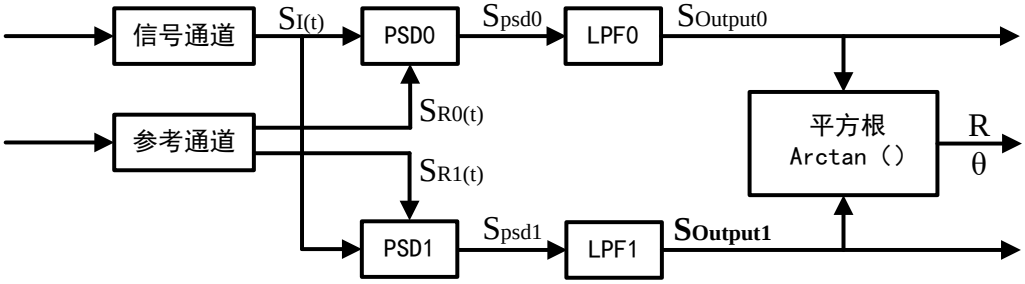


图5. 双相锁相放大器结构图

令相位差$\theta = \varphi - \delta$，其中参考通道产生两个相差 90° 的正弦信号：

$$S_{R0}(t) = A_R\, sin(\omega t + \delta)，\ S_{R1}(t) = A_R \cos(\omega t + \delta)，$$

可计算出输出结果为：$S_{\text{Output0}} = \frac{1}{2} A_I A_R \cos\theta$，$S_{\text{Output1}} = \frac{1}{2} A_I A_R \sin\theta$。

定义 $\mathrm{X} = A_I \cos\theta$，$\mathrm{Y} = A_I \sin\theta$，因此可计算出不依赖于相位差的输出幅值：

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2} = A_I = \frac{2 \times \sqrt{{S_{Output0}}^2 + {S_{Output1}}^2}}{A_R}$$

参考信号与待测信号之间的相位差可由下式得到：

$$\theta = tan^{-1}(Y/X)$$

2.2 OE2011/OE2021 功能原理图

数字锁相放大器 OE2011/OE2021 的原理框图如下所示：

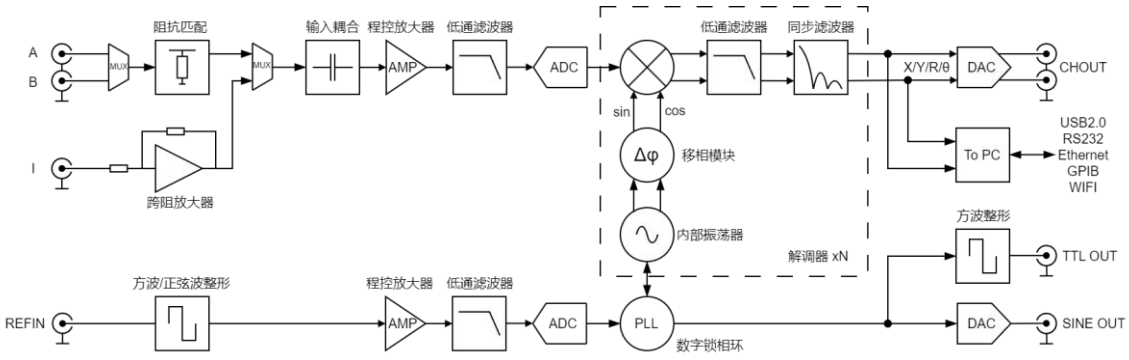


图6. OE2011/OE2021 原理框图

总体来看，OE2011/OE2021 功能模块大致分为信号调理通道、参考信号处理通道、解调器模块、系统主控等部分。左边接口是输入接口，右边接口是输出接口。

当待测信号连接到锁相放大器的电压或者电流输入接口，会被放大到适合的范围然后被模数转换器（ADC）数字化，成为数字信号。数字化的待测信号被送入 8 个解调器通道进行信号解调处理，解调结果输出到 CHOUT 接口，用户可以用示波器等工具进行观察，或者通过通讯接口输出到上位机，用户可通过仪器附带的 LIA_Console 软件进行观察。

OE2011/OE2021 具有 2 个数字锁相环，可同时锁定 2 个 REFIN 接口的参考/同步信号。锁相环的结果可以传输到 Sineout 和 TTLout 接口输出，方便调控其他仪器设备。

2. 3 参考通道

参考通道的功能是为相敏检测器提供与被检测信号相干的控制信号，OE2011/OE2021 的参考信号可根据实际情况来选择正弦波或者方波信号，其输入阻抗为 1 MΩ。OE2011/OE2021 有 2 路参考信号输入通道，方便用户同时解调两种频率分量，也可以对和频/差频信号进行解调。

通常情况下两种参考波形都可以使用，TTL 参考时，要求高电平>3V，低电平<0.5V；正弦参考为交流耦合，正弦信号幅值大于 0.3Vpp 有效。但**当频率低于 1 Hz 时，必须使用 TTL 电平信号模式**。由于正弦波信号在输出的幅值较小时信噪比较低，而且幅值会有抖动，而大多数函数发生器都可以产生稳定的 TTL 同步信号，所以更推荐使用方波信号作为参考信号。

OE2011/OE2021 锁相放大器有两种参考源模式，一为内部参考模式，二为外部输入模式。

当设定为内部参考信号模式时，仪器内部的高精度振荡器和合成算法能够产生用于与输入信号相乘的正弦波信号，此时不需用锁相环进行锁相，内部参考信号几乎不会受到相位噪声的影响。其内部参考模式能够在 10 μ Hz 至 250kHz（仅 OE2011，OE2021 为 1.5MHz）的频率范围内正常工作。由于内部振荡器与外部信号源的振荡器会有一定的频率偏差，而且没有锁相环跟踪锁定，因此内部产生的正弦信号与待测信号之间会有一定的频率差，并且不能保证两者间的相位稳定性。

OE2011/OE2021 也能够使用外部参考信号模式，正弦波信号和 TTL 逻辑电平可作为外部参考信号。当使用外部参考信号模式时，内部振荡器会自动跟踪外部参考信号，保持同频同相。锁相环在实际工作中会产生一定的相位抖动，这可能会造成测量的误差。相位抖动导致参考信号掺杂了不同频率的噪声，根据 PSD 相干原理，输出信号不仅包含有与参考信号频率相同的待测信号，还包含参考信号中其它频率的噪声。实际上，相位抖动一般比较小，不会造成测量问题。如果需要无抖动的测量，可以选用内部参考模式。由于该模式没有使用锁相环，内部振荡器与参考信号是直接相连的，所以没有额外的相位抖动干扰。

2. 4 相敏检波器

OE2011/OE2021 的相敏检波器（PSD）由一个数字乘法器来实现。输入信号放大滤波后由 24 bit A/D 转换器变为数字信号输入到相敏检测器。本产品的相敏检波模块的精度为 64bit。

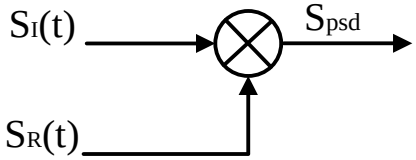


图7. 相干检测核心部分

锁相放大器的相敏检波模块主要实现输入信号与参考信号的相干调制，传统的锁相放大器通过一个模拟乘法器来实现以上功能。但这种以模拟技术实现相干调制的方法存在诸多缺陷，它不仅会极大地限制相敏检波器的精度还会引入很多背景噪声，这些对于微弱信号的测量都是极为不利的。

基于以上考虑，本产品采用数字技术来实现信号的相干调制。因为内部信号发生器产生的参考信号是位宽为 24 bit 的数字信号，所以它能极大地避免谐波分量对相干调制的影响。实际上，谐波分量的抑制可达-120 dB，这就意味着在相干调制的过程中谐波分量几乎没有影响。

另外由于模拟技术实现的相敏检波器存在温度漂移、直流偏置，所以其输出结果往往与实际结果间存在一定的偏差（即系统误差，并且这一系统误差往往带有不确定性），而以数字技术实现的相敏检波器就可以避免这一问题的产生。在系统正常工作的情况下，几乎不会产生相应的系统误差。考虑到模拟乘法器的输入量均是模拟量，所以其参考信号也会受到温度漂移效应的影响。这就会使得参考信号也会存在偏差，进而使得相干调制的结果存在更大的系统误差。

以模拟技术实现的相敏检波器的动态储备基本被限制在 60 dB 以下，这是因为在模拟系统中往往存在很多背景噪声。由于锁相放大器主要用于微弱信号的检测，所以当背景噪声的幅值与信号相接近或是比信号更大时相干调制的结果就会出错。而采用数字技术实现的相敏检波器就不存在此类问题，它的动态储备主要受 A/D 转换的质量限制。一旦输入信号完成数字化后，就不会在相干调制的过程中引入额外的误差。实际上，OE2011/OE2021 的动态储备能达到 130 dB 以上。

综上可以看出，以数字技术实现的相敏检波器在各方面性能上均优于以模拟技术实现的相敏检波器，并且以数字技术实现的相敏检波器还拥有易于调试等优点，因而成为本产品的最优选择。

2.5 滤波器、时间常数和直流增益

相敏检波器的输出包含多种频率成分的信号，其中既有输入信号与参考信号的和频成分也有两者的差频成分以及噪声信号。并且仅当输入信号与参考信号同频时，两者的差频信号才为直流信号。相敏检波器后端的低通滤波器（如图 8 所示）能将除直流分量外的噪声信号以及和频信号滤除，让锁相放大器具备一个高品质带通滤波器的功能。

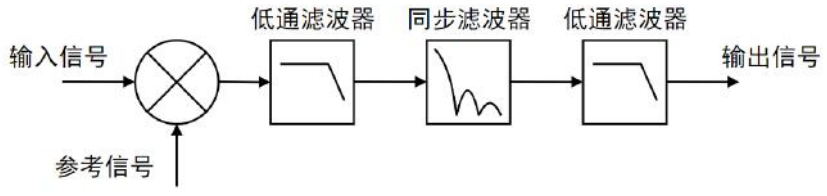


图8. 相敏检波器的滤波器结构

时间常数

相敏检波器后端的低通滤波器的带宽设置方法与常规的低通滤波器相同，均是通过设置时间常数来实现。其中时间常数 TC 的计算公式为：

$$\mathrm{TC} = \frac{1}{2\pi f}$$

其中 f 为滤波器-3 dB 处的截止频率。例如对于一个一阶的 RC 低通滤波器而言，1 秒的时间常数意味着它的-3 dB 的截止频率为 0.16 Hz。

通常情况下，当系统的输入端有噪声时输出端也会因此而产生噪声。但通过增大时间常数的值能够使系统的输出端更稳定也能减轻输入端噪声对输出端的影响。时间常数除了对系统的稳定性和精度有影响外，还会影响系统的响应时间。对于一阶 RC 低通滤波器而言，需要等待 5 倍时间常数以上的时间，才能使输出结果稳定。不同阶数低通滤波器对输入信号的阶跃响应如图 9 所示：

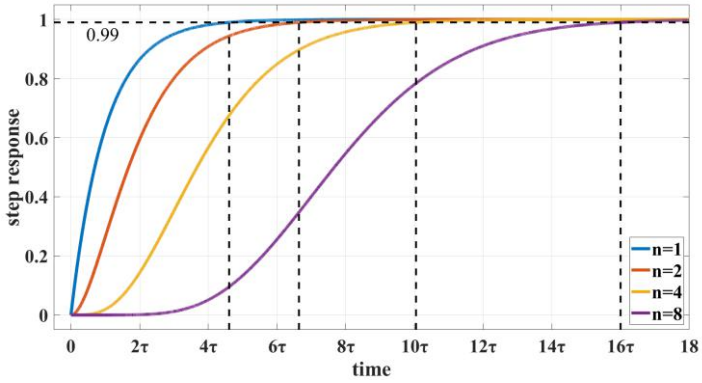


图9. 低通滤波器的阶跃响应

另外时间常数还决定噪声测量时的等效噪声带宽（ENBW）。在此特别说明一下，等效噪声带宽指的并不是滤波器的-3 dB 带宽，它指的是对高斯噪声的有效带宽。

各阶 RC 低通滤波器的等效噪声带宽和响应等待时间如表 1 所示：

表1. 各阶 RC 低通滤波器的 ENBW 和响应等待时间

滤波器阶数	陡降	等效噪声带宽	输出到达 99%稳定度所需时间
1	6 dB/oct	$0.25 \div TC$	$4.6 \times TC$
2	12 dB/oct	$0.125 \div TC$	$6.6 \times TC$
3	18 dB/oct	$0.09375 \div TC$	$8.4 \times TC$
4	24 dB/oct	$0.07813 \div TC$	$10 \times TC$
5	30 dB/oct	$0.06836 \div TC$	$11.6 \times TC$
6	36 dB/oct	$0.06152 \div TC$	$13.1 \times TC$
7	42 dB/oct	$0.0564 \div TC$	$14.6 \times TC$
8	48 dB/oct	$0.05237 \div TC$	$16 \times TC$

数字滤波器与模拟滤波器对比

为了尽量提升锁相放大器的性能，我们采用数字滤波器来实现对相干调制结果的低通滤波处理。与大多数模拟系统与数字系统的对比一样，数字系统拥有很多模拟系统所不具备的优势。首先模拟器件固有的温度漂移和非线性将极大的限制滤波器的滚降程度。其次，要通过模拟器件搭建一个时间常数大、高品质的低通滤波器需要占据相当大的电路板面积，这不仅会使得仪器的成本上升，而且大量的模拟器件也会为今后的调试带来很大的难度。

本产品采用数字技术实现的低通滤波器是一个 64 bit 位宽，直流增益为 0 dB，等效 Q 值最高达 145 dB 以上的窄带滤波器。

同步滤波器

数字滤波器的另一个优势是可以轻松搭建同步滤波器。即使输入信号没有噪声，相敏检波器的输出仍会包含输入信号与参考信号的和频分量（二倍频分量），并且这一和频分量幅值可能会大于所需的差频分量幅值。在频率较低的情况下，要过滤掉二倍频分量所需要的时间常数会很大。例如输入信号是 1Hz 频率的波形，那么二倍频分量即为 2Hz，即使是 10 秒时间常数的二阶 RC 滤波器，对于 2Hz 频率位置的衰减也只有 40 多 dB。

同步滤波器是把参考频率的一个完整周期时间内的所有数据作平均算法，可以有效过滤参考频率的所有倍频分量。在上述的例子中，如果用了同步滤波器，只需要 1 秒的等待时间，即可以实现比 10 秒时间常数的 RC 滤波器更好的效果。

在 OE2011/OE2021 中，同步滤波器被设置为当检测频率低于 10000 Hz 时有效。因为频率更高时，和频分量能够在时间常数较小的情况下被移除，不需要长时间等待，所以此时没必要使用同步滤波器。在同步滤波器的后端我们还设计了多阶滤波器，这样的滤波器组合不仅能够滤除参考信号的谐波分量，还能滤除其余的噪声信号。

较大的时间常数

用模拟技术实现的滤波器很难实现大于 100 s 的时间常数，这是因为此时所需的电容不仅在数值上而且在规格上都过于庞大。但为什么需要如此大的时间常数？因为在某些情况下是别无选择的。例如当参考信号的频率低于 1 Hz 并且存在很多低频噪声干扰时，相敏检波器的输出就会包含很多低频成分的干扰。同步滤波器仅能滤除其中参考信号的谐波分量，其余的噪声信号需要由其后置的滤波器来滤除。

利用数字技术，OE2011/OE2021 能提供最高达到 3000 s 的时间常数，满足大多数测量的需求。

时间常数与滤波器陡降的选择

无论是对信号快速测量，还是旨在获取更加稳定的信号表现，都可以通过调整时间常数和滤波器陡降的组合实现。在保持同等测量精度的前提下，选择更高的滤波器陡降并相应减小时间常数，能够显著提升测量的响应速度。相反，当需要进一步增强测量结果的稳定性时，则可考虑同时增大时间常数与滤波器陡降。

针对特定应用场景，时间常数与滤波器陡降的具体配置需要依据实际情况来灵活选择。一个实用的判断原则是：只要对测量结果的稳定度感到满意，就无需过度增大时间常数和滤波器陡降的设定值，以免延长不必要的等待时间。当然，若想测量结果更加平稳，可以适当

增加时间常数和滤波器陡降。

直流输出增益

相敏检测器的直流输出能有多大？它取决于动态储备的大小。当动态储备为 60 dB 时，代表噪声信号会比满量程的信号大 1000 倍。在相敏检测器中，噪声信号不能超过相敏检测器的输入范围。在一个模拟锁相放大器中，假设相敏检测器的最大输入幅值为 5 V。在它的动态储备为 60 dB 时，相敏检测器输入端的信号将只有 5 mV。而相敏检测器是不会放大信号的，所以其输出仅有几毫伏。即使相敏检测器的直流输出没有误差，后端的放大器直接将其放大 1000 倍到 5V，也很容易使信号失真。如果 PSD 有 1 mV 的偏移量，则将在输出端变为 1 V 的输出。这就是为什么基于模拟技术的相敏检测器不能达到太高的动态储备的原因。

因为基于数字技术的锁相放大器没有采用模拟直流放大器，所以数字锁相放大器不存在直流输出的偏置。数字直流放大器也不存在输入偏移量。数字直流放大器只需将接受到的数据与预先设定好的增益相乘，再将结果输出即可。这就是 OE2011/OE2021 在动态储备能达到 130 dB 时仍能不受偏置影响的原因。

2.6 通道输出和增益

OE2011/OE2021 在后面板有 CH1 和 CH2 两个输出通道。

CH1 和 CH2 的输出与显示

CH1 和 CH2 的输出范围为-10 V 到+10 V，刷新率为 1Msps，数模转换器位数为 16 bit。可根据当前对信号的测量结果与当前设置测量范围的比例，正比到输出。此外，OE2011/OE2021 还能通过前面板的显示屏显示 CH1 至 CH2 的数据源，其中包括被测信号的 X 值、Y 值、R 值、θ 值等数据。

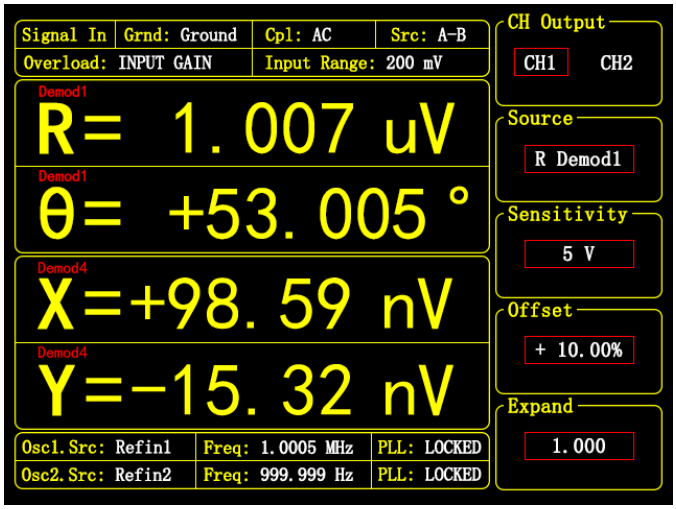


图10. OE2011/OE2021 输出设置界面

X，Y 和 R 的输出偏移与增益

OE2011/OE2021 能够通过设置偏移量以抵消测量时的误差。这对于测量值在某些标称值附近存在误差的情况下是极其有用的。因为偏移量可以在范围内任意设置，所以输出的偏移量可以说几乎为零。输出的变化可以直接从显示屏或面板的输出端读出。偏移量以满刻度输出的百分比形式表示，并且这一比值不会因为灵敏度的变化而改变。偏移量最多可以设置为满刻度输出的±100%。

此外，该系统还具备对 X、Y 及 R 的输出值进行放大的能力。这一特性是通过将输出数据乘以一个特定的增益系数来实现的。据此，即便是仅有满偏刻度十分之一大小的信号，在经过放大处理后，其输出也能从原本的 1V 提升至 10V。输出信号增益的主要作用在于，能够显著提升特定非零值附近的测量精度与分辨率。

在不超过满偏刻度的情况下，OE2011/OE2021 能够提供增益系数为+0.001 ～ +10000 的多个档位的输出增益。其输出的计算公式为：

$$\text{Output} = \left(\frac{\text{Signal}}{\text{Sensitivity}} + \text{Offset}\right) \times \text{Expand} \times 10(\text{V})$$

<Offset>可在 -100% ～ +100% 之间进行设置，可通过数字键盘直接输入，最小步进为 0.01%；<Expand>值可在+0.001 ～ +10000 之间进行设置，可通过数字键盘直接输入，最小步进为 1。例如：

$$\text{Output} = \left(\frac{0.1\text{mV}}{1\text{mV}} + 0.2\right) \times 2 \times 10(V) = 6(\text{V})$$

2.7 动态储备

动态储备的定义是最大可容纳的噪声信号和满量程信号的比值。动态储备表示锁相放大器对噪声容忍程度的大小，通常以 dB 表示。

$$\text{动态储备} = 20\lg\frac{\text{OVL}}{\text{FS}}(\text{dB})$$

其中 OVL 表示输入总动态范围，FS 是最大量程，表示输出动态范围。若动态储备为 100dB，表示系统能容忍的噪声可以比有用信号高出 10^5 倍。

实际上动态储备设置应该保证整个实验过程中不发生过载，过载还可能出现在前置放大器的输入端和 DC 放大器的信号输出端。系统的输入增益与动态储备成反比，因为噪声也会随着输入增益而放大，因此**可以通过减少输入增益来实现高动态储备。**前级放大倍数设置为较合理范围，以防止噪声过载，经过 PSD 和低通滤波器滤掉了大部分噪声后，直流放大倍数设置为较大值，将信号放大到满量程。

锁相放大器的输入信号在 PSD 处理之前需要交流放大，而在 PSD 处理之后进行直流放大即可。在总增益不变的情况下，如果调整交流增益增加，直流增益减小，则输入噪声经交流放大很容易使 PSD 过载，动态储备减小，同时输出的直流漂移减小。反之，如果增加直流增益，降低交流增益，则动态储备提高，使锁相放大器具有良好的抗干扰能力，但以输出稳定性为代价，降低了测量精度。

直流放大输出精度受噪声的频率和幅值影响。幅值较大且与信号频率相同的噪声经过 PSD 后同样变成直流信号，这样经过低通滤波器时直接叠加到输出，对输出结果造成影响。

动态储备与噪声频率有关。在参考频率处的动态储备为 0，远离参考频率时动态储备增

加，离参考频率足够远时，动态储备可达到最大值。参考频率附近的动态储备对仪器噪声容限极其重要，增加低通滤波器的级数可以提高滤波效果，从而增加参考频率附近的动态储备。远离参考频率的动态储备一般比较大，但一般对测量影响不大。

OE2011/OE2021 动态储备可达 130 dB 以上，高的动态储备会产生输出噪声和漂移。当动态储备较高时，由于模数转换器的噪声存在导致输出误差增加。所有的信号源都存在本底噪声，因此在 PSD 提取信号过程中就会掺杂着噪声，如果噪声很大，在高动态储备测量中就会产生较大的输出误差。如果外部噪声较小，则其输出主要是受 OE2011/OE2021 自身噪声影响。这时可以通过降低动态储备和直流增益来降低输出误差。因此，**在实际应用中应尽量使用较低动态储备，即较高的输入增益。**

2.8 信号输入放大和滤波

锁相放大器可以测量低至纳伏级的微弱信号。模数转化器可以将模拟信号数字化，但信号必须达到能被识别的强度。因此低噪声信号放大器必须有足够大的增益，将信号放大到可直接被模数转化器转化的程度，而无需降低信号的信噪比。OE2011/OE2021 的模拟放大倍数增益大约在 0.2 到 1200 倍，但无论增益设置多大都不会提高信噪比。

直流信号和交流信号的总增益由灵敏度确定，两者各自的增益则由动态储备设定。

输入噪声

OE2011/OE2021 信号放大器的输入噪声约为$10\ \mathrm{nVrms}/\sqrt{Hz}$。如果放大器的输入噪声为 $10\ \mathrm{nVrms}/\sqrt{Hz}$，增益为 1000 倍，那么将输出$10\mu\mathrm{Vrms}/\sqrt{Hz}$ 噪音。假设放大器的输出为一阶 RC 低通滤波器（6 dB/oct 的滚降），RC 过滤器的时间常数为 100 ms。放大器的输入噪声和电阻的约翰逊噪声具有高斯噪声性质，其噪声的量正比于该噪声带宽的平方根。单级 RC 滤波器的等效噪声带宽（ENBW）为 1/(4×TC)。这意味着，对滤波器输入的高斯噪声进行滤波，其有效带宽等于 ENBW。在这个例子中，滤波器输入端有$10\mu\mathrm{Vrms}/\sqrt{Hz}$ 噪声，其等效噪声带宽为 2.5 Hz，滤波器的输出电压噪声为 $10\mu\mathrm{Vrms}/\sqrt{Hz}\times\sqrt{2.5\mathrm{Hz}}=15.8\mu\mathrm{Vrms}$。对于高斯噪声，噪声峰峰值是噪声有效值的 6.6 倍左右。因此，输出有大约 104 μV 峰峰值噪声。

锁相放大器的输入噪声同理。在设置增益为 1000 倍时，输入增益达到最大，输入噪音的大小将决定输出噪声。而低通滤波器的等效噪声带宽又影响输出的噪声量。

等效噪声带宽取决于时间常数和滤波器滚降（参考 2.5 章）。例如，将 OE2011/OE2021 设定到<1mV>量程，设置时间常数为<100 ms>以及<6 dB/oct>的滚降，则其等效噪声带宽为 2.5 Hz。这个设置下，等效到输入端的噪声为 15.8 nVrms，输出为量程的 0.32%（即 15.8nV/5μV），噪声峰峰值则是满量程的 2%左右。

假定信号是由一个低阻抗信号源发出。其中电阻约翰逊噪声为$0.13\times\sqrt{\mathrm{R}}$，以 100 Ω 电阻为例，常温下其约翰逊噪声为 1.3 $\mathrm{nVrms}/\sqrt{Hz}$。而一个阻抗为 10 kΩ 的信号源的约翰逊噪声 13 $\mathrm{nVrms}/\sqrt{Hz}$ 都大于 OE2011/OE2021 的自身输入噪声。系统总噪声大小由各个噪声源的平方之和后开根号计算出来。例如，一个 10 kΩ 阻抗的信号源接入到锁相放大器，它自身的约翰逊噪声和 OE2011/OE2021 的输入噪声叠加起来，总噪声大小为$\sqrt{10^2+13^2}=16.4\ \mathrm{nVrms}/\sqrt{Hz}$。

在增益较低时，经过放大后的噪声信号仍然低于模数转化器的自身噪声，此时系统的输出噪声主要是模数转换器噪声，但这种情况下的滤波器之后的直流增益很低，输出的噪声相

对于有用信号可忽略不计。

抗混叠滤波器

输入信号经过陷波器和放大电路之后，会通过抗混叠滤波器，这是信号的数字化处理前必须要完成的。根据奈奎斯特定理，采样频率至少是信号频率的两倍。比如信号频率是 100-kHz，那至少需要 200 kHz 采样频率才能进行采样。OE2011/OE2021 的 A/ D 转换器采样频率是 4MHz，A/D 转换器无法转换高于 2 MHz 频率的信号，高于 2 MHz 的信号会违反奈奎斯特定理，导致欠采样。欠采样的结果是 A/D 转换器输出的数字流中，高频的信号将出现在低频部分，即信号发生混叠，造成测量错误。

为了避免欠采样这种情况，先将模拟信号进行低通滤波处理，消除信号超过 2MHz 的高频部分。低通滤波器具有平坦的通带（0-1.5 MHz），在这个频率范围内的信号不会受影响。高于 1.5 MHz 的高频部分信号会被逐渐衰减，从 1.5 MHz 至 2.5 MHz 是过渡阶段，对高于 2.5MHz 频率的信号和噪声产生 100 dB 以上的衰减。

输入阻抗

OE2011/OE2021 的输入阻抗为 10MΩ。如果需要更高的输入阻抗，可以使用 OE2011/OE2021 配套的前置放大器 OE400X 系列。OE400X 系列前置放大器的输入阻抗可达 100 MΩ 或更高，满足用户的各种使用场景。

2.9 输入端连接

噪声存在于所有的电路中。即使在信号幅值较大的情况下，噪声也会降低测量的精度。为了得到最佳测量精度，必须注意减少实验环境中可以避免的噪声源。除了系统固有噪声之外，其他噪声源（如市电噪声、信号发生器的噪声、在空间分布的电磁场等）的影响和不同仪器之间的地电平差、地环路问题，可以在输入连线的环节降低影响。

我们的仪器有两种输入连接的方式，单端连接和差分连接。单端连接非常的方便，而差分连接则能有效消除噪声的影响。

单端连接模式（A）

单端连接模式中，使用 A 输入端。锁相放大器检测 A 输入接口的中心导体和外壳导体之间的电压差。

一般认为，地电平是 0 V 的常量，然而不同仪器的地电平会有些许的差异。当信号源的地电平与检测仪器的地电平直接相连时，它们的电平差值会导致一个大电流，即接地回路，这时候处于较高地电平的仪器的电流都通过较低地电平的仪器回流到大地，这样会导致两个严重问题：一是较高地电平的仪器的噪声直接输入到低地电平的仪器里，二是低地电平的仪器有可能因为电流过大而损坏。要解决这个问题，通过在两个不同电平的地之间连接一个电阻就能消除接地回路问题，在 OE2011/OE2021 里，有浮地（Float）和接地（Ground）两种电阻模式选择，浮地采用 10kΩ 电阻，而接地采用 10 Ω 电阻短接。

另外，单端连接模式对噪声抵抗能力较弱。单根信号线就像天线，会被环境的电磁噪声所影响，屏蔽层会吸收这些噪声，因为单端连接模式是检测中心信号线和屏蔽层的电压差，

因此这些噪声会被带入锁相放大器内部。

差分连接模式（A-B）

差分连接模式有两根信号线连接到信号源，每一根接到对应的输入端（A、B）中。这个模式下检测 A 和 B 接口的中心导体之间的电压差，两个接口的外壳屏蔽层吸收的噪声不会被锁相放大器获取。

使用差分连接模式有一个需要注意的地方，两个输入端的电缆应该紧密缠绕，不应形成环路，以免产生电磁感应，从而给测量带来误差。

交流耦合和直流耦合模式

OE2011/OE2021 对输入的信号有交流耦合和直流耦合两种模式。交流耦合通过一阶 RC 高通滤波器（-3dB 频率是 0.16Hz）来滤除直流和较低频率信号，交流耦合应该在信号频率大于 10Hz（保证通带平坦度）的情况下使用。对于低于 10Hz 频率的信号，应该使用直流耦合模式。直流耦合模式不对输入信号有任何阻碍。

如果输入信号含有直流成分，若没有被去除，那会带来几个隐患：在放大电路中直流分量也会被放大，如果被放大到超过 A/D 转换器的输入范围，那么就会使测量结果产生误差，也有可能损坏 A/D 转换器。另外直流量被 A/D 转换器量化成数字量后，在 PSD 里会和参考正弦信号相乘，那么需要更强大的低通滤波器才能滤除，会导致需要更久的测量时间。

当待测信号的频率大于 10Hz 时，建议使用交流耦合模式。

2. 10 固有噪声

噪声

从主观的角度出发，可认为凡是不希望得到或者有碍于准确测量的输入或影响均可称之为噪声。噪声具有瞬时性和不可预知性的随机性。几乎所有测量领域，探测弱信号的最终限制因素都在于噪声。即使要测量的信号并非很弱，噪声的存在也会降低测量精度。某些形式的噪声是无法避免的(例如待测信号的抖动)，只有通过信号平均和缩小带宽等技术来克服。而另一些形式的噪声(例如射频干扰和接地回路)可以由很多技术来消除或降低，包括滤波和良好的线路结构和元件布局。同时，放大器本身在工作时也会产生噪声，可以通过低噪声放大器设计技术解决这一问题。

电子系统中存在各种各样的固有噪声源，这些噪声有它们的物理含义。

约翰逊噪声 (Johnson Noise)

任何一种无源器件，其导体中的电子始终在做随机运动，其两端会因此产生一个噪声电压，这就是约翰逊噪声，也称为白噪声或热噪声。它存在于所有电子器件和传输介质中。它受温度变化的影响，但与频率变化无关。从频域上看，热噪声在整个频段具有均匀的功率谱密度，即类似于白色光谱，它不能够被消除的，因此是电子系统性能的上限的影响因素之一。

在温度为 T 时，由一个电阻 R 产生的实际噪声电压由下式计算出来:

$$V = \sqrt{4kTRB}$$

其中 k 为玻尔兹曼常数，$k=1.38\times10^{-23}$ J/K，T 是以开尔文为单位的热力学温度(热力学温度与摄氏度的转换关系为：$^0K=^0C+273.16$)，B 是以赫兹为单位的带宽。

随后，Nyquist 利用热力学推理以数学方式描述了热噪声的统计特性，并证明了热噪声功率谱函数为

$$St(f) = 4KTR(V^2/Hz)$$

例如，室温下，将一个 10K 电阻接入高保真放大器的输入端，输出端接伏特表，用带宽为 10 kHz 的滤波器来测量它的的开路有效电压，结果为 1.3 μV。

热噪声电压的瞬间幅度在任何情况下一般来说都是不可预见的，但是它遵循高斯分布。其意义就在于它是任何检波器、信号源或者放大器的噪声电压的下限。源内阻的阻抗部分会产生热噪声，放大器的偏置和负载电阻也同样如此。

散射噪声（Shot Noise）

电流其实是一股离散的电荷流，而不是一种真正的流体。电荷量的有限性导致了电流的统计性起伏。如果电荷之间互不影响，那么电流的波动就由下式给定:

$$I_{noise} = \sqrt{2qIB}$$

其中 q 为电子电荷(1.6×10^{-19} C)，I 为电路中 RMS 电流值，B 为测量带宽。例如，一个稳定的 1 A 电流，在 10 kHz 范围内测量，其有效值波动为 57 nA，也就是在 0.000,006%上下波动。对于更小的电流，其波动更大：一个稳定的 1 uA 的电流在 10 kHz 范围内测量值的均方电流波动为 57pA，也就是 0.006%的波动。对于 1 pA 的电流，均方电流噪声波动为 56 fA(在同样带宽测量)，也就是 5.6%的波动!

随后证明了散弹噪声电流也是一种白噪声，其功率谱密度函数为

$$S_{sI}(f) = 2qI(A^2/Hz)$$

前面给出的散射噪声公式是假设电流中的载流子互不影响而得出的。当电荷通过一个势垒时，这种假设确实是存在的，例如面接触型二极管中的电流是以电荷的扩散形式传播的。但是对于最常见的金属导体来说就不是这样，其载流子之间有着很密切的联系。

1/f 噪声（Flicker Noise）

1925 年，Johnson 在电子管电流中首次发现 1/f 噪声，其突出特点在于该噪声的功率谱函数正比于 1/f。频率越低，噪声越严重，因为又称为低频噪声。其微观机理在于当两种导体接触不理想时，其接触电阻将发生随机涨落，从而引起噪声。

尽管对 1/f 噪声研究已达数十年，然后其适用的情形不一从而有许多的描述模型。其电流幅度满足高斯分布，功率谱密度正比于工作频率的倒数，起功率谱密度函数表示为：

$$S(f) = \frac{KI_d^2}{f}(V^2/Hz)$$

1/f 噪声也叫闪烁噪声（flicker noise），是有源器件中载波密度的随机波动而产生的，它会对中心频率信号进行调制，并在中心频率上形成两个边带，降低了振荡器的 Q 值。由于 1/f 噪声是在中心频率附近的主要噪声，因此在设计器件模型时必须考虑到它的影响。

散射噪声和热噪声都是由于物理特性而产生的不可避免的噪声。对于相同阻值的电阻，制作精良的电阻和便宜的炭阻所产生的热噪声完全一样。另外，实际设备都会有各种各样的过量噪声源。实际中的电阻都存在阻值的波动，其结果是产生一个附加的噪声电压(与永久存在的热噪声叠加在一起)，其值与流经它的直流电流成正比。这一噪声和很多与电阻构造相关的因素有关，其中包括电阻的材料，特别是封装技术。以纯炭阻，碳膜电阻，金属膜电阻和绕线电阻为例，绕线电阻的噪声最小，金属膜电阻次之，炭膜电阻再次之，纯炭阻最大。

2. 11 外部噪声源

内部固有噪声是难以避免的，只有尽可能减少这种噪声的大小。相对于固有噪声而言，外部噪声的形式各种各样，而且绝大多数的噪声源都是异步的。外部噪声源主要通过增加动态储备和时间常数的要求，进而影响了测量的时间。少数的噪声源和参考信号联系紧密，与实际测量信号相加或相减，造成测量结果的错误。幸好，外部噪声源可以通过多种途径尽可能减少。

电容耦合

由于布线之间总是有互容，互容如同寄生在布线之间的一样，所以叫寄生电容，又称为杂散电容。极板与周围体（各种元件甚至人体）也产生电容联系。而在锁相放大器附近的交流电压信号可以用过这些寄生电容耦合到设备上。虽然寄生电容可能很小，但耦合来的电压信号仍然有可能比待测微弱信号要大。

寄生电容的影响可由以下公式计算出来：

$$I = \omega C_{stray} V_{noise}$$

其中，ω是噪声频率的 2 π 倍，C_{stray}为寄生电容容值，V_{noise}是噪声的振幅。

当噪声源频率变大时，耦合噪声将会变大。如果噪声源和参考频率一致，对测量结果的影响会很大。因为锁相放大器会滤除其他频率的噪声，但是会把与参考频率一致的噪声当作信号进行测量。

减少电容耦合的方法:

- 移除噪声源，或者尽量把噪声源远离仪器和信号线。
- 设计低阻抗的实验装置，这样耦合的噪声电流就只会产生很小的噪声电压。
- 容性屏蔽，例如将整套实验装置放入金属盒中。

电感耦合

交流电附近会感应出一个磁场，如果放置器件在交流电附近，感应的磁场会耦合到电路中进而影响电路。变化的交流电会产生变化的磁场，变化的磁场感应产生电动势，感应电动

势会影响电路的电流电压，进而使实验的测量发生偏差。电动势的大小和磁场变化的频率有关，频率越快，电动势越大，对实验的测量影响就越大。

减少感性耦合的方法：

- 尽可能移除仪器附近的噪声源。
- 使用双绞线或者紧密缠绕的两根同轴电缆线以减小环路效应。
- 对仪器进行磁性屏蔽，防止磁场进入并穿透测量的区域。

阻性耦合和接地环路

接地环路也会变成一个干扰源，能在传输两端的接地之间产生噪声电压，如果噪声电压足够大，就会导致测量错误。接地环路是系统接地方案中的一个物理环路，产生于电路之间的多个接地途径。这些接地路径可以充当一个大环路天线，从环境中捕获噪声，从而在接地系统中产生电压。工频交流电源的 50Hz 磁场是接地环路捕获的常见噪声源，类似地，对于分布式接地系统，源于某个位置的地电压也能引起地电流在接地环路中流动。由于地为低阻抗，因此噪声电流往往相当大。数百毫伏的噪声可能会引起数安培的电流流过接地环路。

消除接地环路电流的途径：

- 将所有的地连接到同一个点。
- 地总线应尽可能粗，这样可以降低地连接中的阻抗。
- 小信号的接地线上应避免有大电流的接地回路接入。

颤动噪声效应

大部分噪声源都是以电气的形式影响电路，然而机械振动的噪声也可通过颤噪效应转化成为电气形式。因微振动而使传输电缆或者待测信号产生的机械振动，会产生频率变化的电形式噪声。

消除颤噪效应的方法：

- 在测量时，尽可能地减少机械的振动。
- 传输微弱信号的传输线应绑紧固定以减少它们的颤动。
- 用低噪声的电缆来替代普通电缆以减少颤噪效应。

热电偶效应

热电偶效应，指的是两种不同的金属相互接触时在它们之间产生的电势差。产生接触电势差的原因是：（1）两种金属电子的逸出功不同。（2）两种金属的电子浓度不同。若 A、B 两种金属的逸出功分别为V_a和V_b，电子浓度分别为N_a和N_b，则它们之间的接触电势差为

$$V_{ab} = V_a - V_b + \frac{kT}{q} \times \ln\left(\frac{Na}{N_b}\right)$$

其中 k 为玻尔兹曼常数，k =1.38×10^{-23}J/K。T 是以开尔文为单位的热力学温度(热力学温度与摄氏度的转换关系为：^{0}K=^{0}C+273.16),其中 q 为电子电荷(1.60 x 10^{-19} C).由上式可得知接触电势数值决定于金属的性质和接触面的温度，因不同金属的功函数(电子逸出金属表面所需的功)不同而产生。

当两种金属接触时，在接触点产生的电动势会在原电平的基础上增加了一个缓慢变化的毫伏级的电平。这种噪声与温度密切相关，由于温度变化缓慢，因为这种噪声频率也很低。

热电偶效应会随着检测器输出变大而增长，在低频率时影响较大，尤其是 mHz 级别的测量时，影响更大。

消除热电偶效应的方法：

- 测量仪器尽可能保持在恒温状态。
- 使用补偿特性的节点。

2.12 噪声测量

OE2011/OE2021 提供噪声测量功能，可以测量输入信号在参考频率下的噪声。部分噪声源对频率有相关性，锁相放大器可以对这些噪声源进行测量。

根据用户设定的 RC 滤波器的带宽，锁相放大器可以理解为以参考频率为中心频率，通带带宽为 RC 滤波器带宽两倍的带通滤波器。因此参考频率附近的噪声会保留在输出端。当输入信号就是一个噪声源，那么锁相放大器就可以测量其在设定频率上的噪声值。若把频率按照扫频的方式测量，还能得到噪声源的噪声功率谱图。

OE2011/OE2021 测量噪声的方法是首先计算一段时间内 X 值的均方差，其含义是参考频率附近一定带宽内的总噪声。而这个带宽就是 PSD 之后的数字滤波器的带宽，因为不同带宽得到的噪声是不同的，所以接下来要进行归一化处理。把计算得到的均方差除以数字滤波器的等效噪声带宽的平方根（$\sqrt{ENBW}$），得到的噪声谱密度就是需要的测量值，其单位是 V/ √ Hz。等效噪声带宽的计算可以参考 2.5 章节的表 1。

2.13 辅助模拟输入/输出（AUX IN/OUT）

OE2011/OE2021 包含了四路 16 位的高精度辅助 AUX-ADC 输入，输入电压范围为±10 V，最小分辨率达 0.1 mV，采样率为 150 ksps。这四路 ADC 提供输入信号钳位保护和内部差分放大功能，输入阻抗达 1MΩ，可同时进行信号采集，用来测量低速模拟信号，或者测量从某个实验得到的直流信号（例如来自温度传感器或者压力传感器），以便于进行比例运算和传送给控制计算机。

OE2011/OE2021 同时包含了四路 16 位的高精度辅助 AUX-DAC 输出，输出电压范围为 ±10 V，最小分辨率达 0.1 mV，数据刷新率为 500 ksps。可以根据用户需要提供辅助电压输出。

AUX IN 和 AUX OUT 的接口采用标准 BNC 接头，集成在 OE2011/OE2021 后面板。对 AUX-IN 数值显示设置在[DISPLAY]子菜单中进行，而 AUX-OUT 的输出值设置在[AUXOUT]子菜单中进行。

2.14 信号发生器

OE2011/OE2021 可以选择内部振荡器 OSC1 或者 OSC2 作为信号源输出任意幅值的正弦波信号，幅值范围为 100 nV 至 5 Vrms，输出阻抗为 50Ω，驱动电流能力达 80mA，可额外添

加±5V_{DC} 范围的直流偏置。输出信号的相位与仪器内部振荡器保持同步，并且可以独立设置相位偏移。

对于需要偏置电压的外部设备，如电光调制器，OE2011/OE2021 凭借其卓越的驱动能力，可以直接驱动设备而无需额外的电平转换放大器。

OE2011/OE2021 的信号发生器支持 AM/FM/PM 调制功能，方便用户对系统进行调制控制。

2.15 多谐波测量

谐波是指周期函数或者周期性波形中能用常数、与原函数的最小周期相同的正弦函数和余弦函数的线性组合表达的部分。根据傅立叶级数的原理，周期函数都可以展开为常数与一组具有共同周期的正弦函数和余弦函数之和。其展开式中，常数表达的部分称为直流分量，最小正周期等于原函数的周期的部分称为基波或一次谐波，最小正周期的若干倍等于原函数的周期的部分称为高次谐波。

传统的锁相放大器中，同一时间只能测量基频信号或者某个谐波信号分量。在很多的实际应用上，往往需要对多个谐波的同时测量和记录。这时，目前的锁相放大器就很难满足要求了。

OE2011/OE2021 突破性的开发了多谐波同时测量功能，8 个独立的解调器通道最多可以同时进行 8 个谐波分量的测量。原来需 8 台锁相放大器完成的工作，现在一台 OE2011/OE2021 即可完成。

对多谐波的测量设置在[DEMOD REF]菜单中进行。

除了多谐波测量功能之外，OE2011/OE2021 还增加了任意频率解调功能以及公式组合频率解调功能。

3. 界面介绍

3.1 前面板

图11. OE2011/OE2021 前面板

3.1.1 显示屏

OE2011/OE2021 使用 5.6 英寸 TFT 显示屏作为用户的数据显示与交互控制。显示屏分辨率为 640*480，有 8 级的背景亮度可供用户选择，可以在[SYSTEM]子菜单设置。

屏幕的左边大幅区域用于显示输入信号的测量结果，支持单区域或双区域显示。此外，单区域显示支持数字、条形图显示，双区域显示支持所有测量参数显示，可以在[DISPLAY]中的<Display Mode>选项中设置。

屏幕的右边区域用于测量控制条件的选择与修改。

3.1.2 软键

显示屏的右边有 5 个软键。软键根据不同的当前目录有着不同的功能。总体来说，软键有着两个主要功能，一是在不同的设置选项进行选择，二是高亮某些参数，然后使用旋钮或键盘进行输入。不管哪种功能，软键只对屏幕右方与软键相邻的参数起作用。

3.1.3 旋钮

旋钮可以调整那些被软键高亮的参数。大部分的参数均可以使用旋钮进行调整。沿顺时针方向旋转是增大参数，沿逆时针方向旋转是减小参数。

3.1.4 键盘

键盘由 3 组键组成。ENTRY 区域主要对被软键高亮的参数进行数据形式的输入。MENU 区域改变屏幕右方的参数列表，并提供 10 个不同的功能菜单。ARROW 区域提供某些高亮参数的选择，如 Sensitivity 范围设置，频率对单一个位进行修改等。

3.1.5 BNC 连接器

5 个 BNC 连接器，从左往右分别是 SINE OUT, REF IN 1, REF IN 2, SIGNAL IN-B, SIGNAL IN-A/I。

SINE OUT

信号发生器提供最大 5 Vrms 的幅值可编程正弦波输出，输出阻抗为 50 Ω。当外部参考信号使用时，信号发生器通过锁相环与参考信号进行锁相。

REF IN 1 / 2

参考信号输入可以使用正弦波或 TTL 方波驱动，输入阻抗为 1 MΩ。正弦波输入为交流耦合，支持>1Hz 的信号。对于低频应用的情况(<1 Hz)，推荐使用 TTL 方波的参考信号。

SIGNAL IN A / B / I

信号输入可以选择单端电压输入 A、差分电压输入 A-B、和单端电流输入 I。当测量电压信号时，A、B 两个接口输入阻抗均为 10MΩ//25 pF。当测量电流信号时，I 接口输入阻抗为 100 Ω 或 1 kΩ。

3.2 后面板

图12. 后面板

OE2011/OE2021 后面板如图 12 所示，包括散热风扇，电源接口，电源开关，USB2.0 接口，RS-232 母接口，以太网接口，Digital-IO 接口以及扩展功能接口。其中，扩展功能接口包括 AUX IN、AUX OUT、CH OUT、MONITOR OUT、TRIGGER IN/OUT、CLOCK IN/OUT、和 TTL OUT。

3.2.1 电源接口

电源接口用于整台仪器供电输入，接受 220 V、50 Hz 交流市电，内置保险丝，同时兼备滤除高频噪声干扰的滤波器功能。

3.2.2 USB2.0

USB2.0 高速接口允许 OE2011/OE2021 锁相放大器与 PC 机进行通信。可以通过 PC 机对 OE2011/OE2021 进行控制和读取数据。

3.2.3 RS232

RS232 接口是标准的 9 针 RS-232 母接口，可允许 OE2011/OE2021 与其他上位机进行通讯。

3.2.4 以太网接口

以太网接口通讯数据高达 1000Mbps，可跟 PC 机进行快速通讯。

3.2.5 AUX IN

四路辅助 AUX-IN 输入，输入范围±10 V，最小分辨率为 0.1mV。

3.2.6 AUX OUT

四路辅助 AUX-OUT 输出，输出范围±10 V，最小分辨率为 0.1mV。

3.2.7 CLK IN

CLK IN 是外部时钟输入接口，允许 10 MHz、3.3V TTL/CMOS 电平时钟信号输入，用于与外部仪器同步时钟使用。

☆注意，如果外部时钟源稳定性不好，会使 OE2011/OE2021 性能下降。

3.2.8 CLK OUT

CLK OUT 提供 10 MHz 时钟输出接口，工作电平为 3.3V TTL/CMOS。

3.2.9 SYNC IN & SYNC OUT

同步输入与输出接口用于多台 OE2011/OE2021 之间的同步。

3.2.10 MONITOR OUT

MONITOR 提供了一个模拟放大、滤波之后得到的输出信号，即输入到 ADC 之前的信号。由于模拟放大也会放大噪声，MONITOR 输出并不适合观察到原信号幅值十分小的信号。

3.3 主界面

OE2011/OE2021 主界面中可以分为四个部分。

3.3.1 状态栏

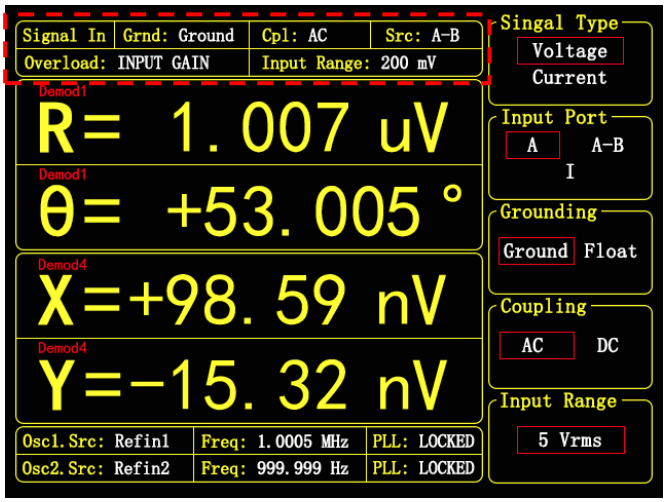


图13. 主界面-状态栏 1

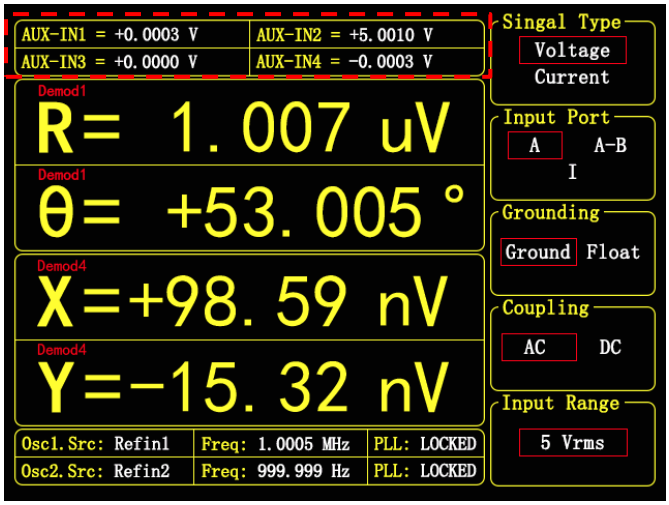


图14. 主界面-状态栏 2

如图 13、图 14 所示，状态栏用于指示当前系统的设置情况和测量的数值，可在[DISPLAY]子菜单中切换显示，此部分显示的内容包括：

<Grnd> ： A、B 接口外壳屏蔽层接地方式

<Cpl> ： 输入耦合方式

<Src> ： 输入接口模式

<Overload> ： 输入过载、溢出的状态量，能够提示前级输入和放大是否溢出。若未发生溢出，则显示：Overload: NONE NONE；若前级输入溢出，则显示 Overload: INPUT NONE；若放大溢出，则显示 Overload: NONE GAIN；若同时溢出，则显示 Overload: INPUT GAIN。无论哪种溢出，需尽快把输入信号和增益减小以防止对机器造成过压损伤。

<Input Range>： 输入量程

<AUX-IN1> ： AUX-IN1 接口输入幅值
<AUX-IN2> ： AUX-IN2 接口输入幅值
<AUX-IN3> ： AUX-IN3 接口输入幅值
<AUX-IN4> ： AUX-IN4 接口输入幅值

3.3.2 数据栏

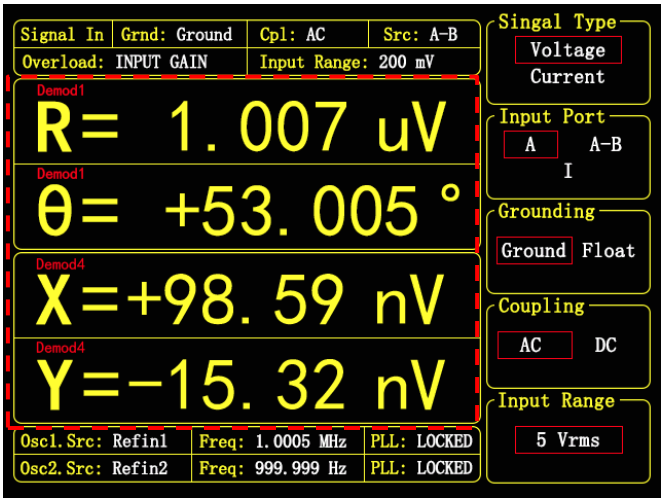


图15. 主界面-数据栏

如图 15 所示，可在[DISPLAY]子菜单中选择显示<X>、<Y>、<R>、<θ>值，显示方式可选择数字图、全数据显示图。设置方式详见[DISPLAY]子菜单。

3.3.3 监测栏

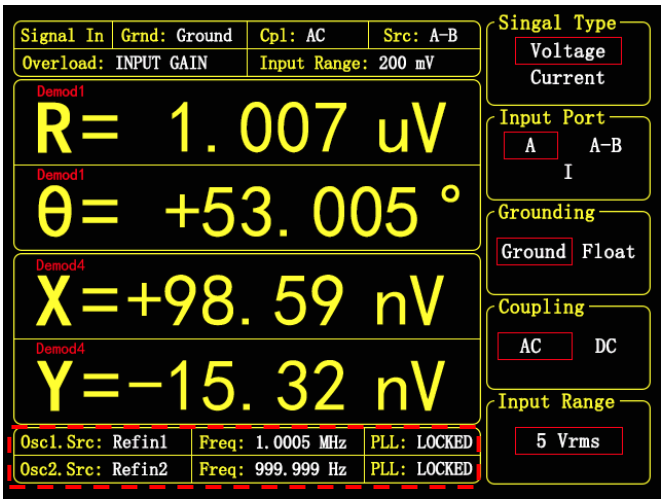


图16. 主界面-监测栏

监测栏一共显示三项内容，包括：
<Osc.Src> ：振荡器的输入源。显示选用的参考信号源是内部参考还是外部参考。

<Freq> ：输入信号频率。显示输入信号的频率。

<PLL> ：锁相环的锁相提示，提示相位是否锁定。当锁相环已经锁定，则显示 PLL: LOCKED；当没有参考信号，或者锁相环未锁定，则显示 PLL: UNLOCKED；当使用内部参考时，一直显示 PLL: NONE。

3. 3. 4 功能栏

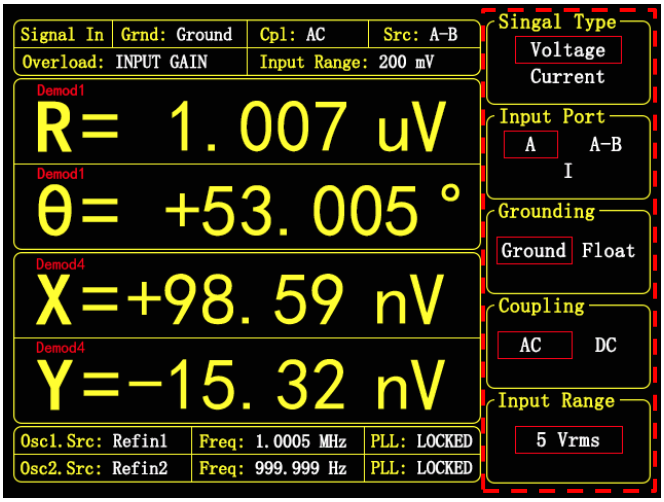


图17. 主界面-功能栏

如图 17 所示，功能设置框内有多种功能选择，与前面板的 5 个深灰色按键相对应，在不同的子菜单中有不同作用，是控制系统的主要方式。

4. 上位机介绍

4. 1 上位机概述

OE2011/OE2021 配套有上位机软件 LIA_Console。LIA_Console 是基于 QT 平台开发的新一代图形化界面，通过锁相放大器流程图的展现锁相放大器的功能配置，相比于屏幕界面，LIA_Console 更加易用易懂。同时 LIA_Console 支持高速传输和本地数据保存，方便用户。LIA_Console 的界面如图 18 所示：

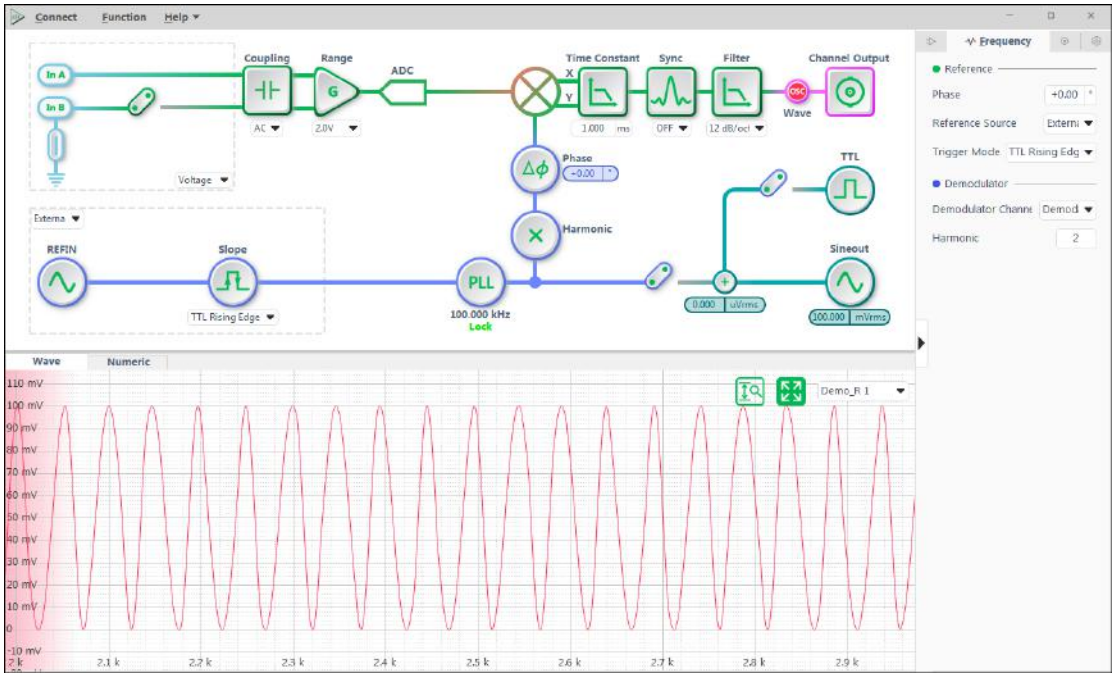


图18. LIA_console 软件界面

LIA_Console 主要分开 3 个选项卡区域，分别是流程图配置区域、功能菜单区域、测量结果显示区域。每个区域的作用为：

流程图配置区域：用流程图的形式，展现 OE2011/OE2021 的主要配置功能，用户可在流程图中配置锁相放大器的各个功能，相比晦涩难懂的功能名称，在流程图中用户更加明确每个功能的作用。

功能菜单区域：包含 OE2011/OE2021 的所有参数配置，与流程图配置区域同步，其中一侧改变配置，另一侧都会同步更新。另外在流程图配置区域中没有的配置选项，都会在这个区域里展现。

测量结果显示区域：本区域显示 OE2011/OE2021 的测量结果，可以选择数值显示，或者波形图显示。

各个区域的位置如图 19 所示。

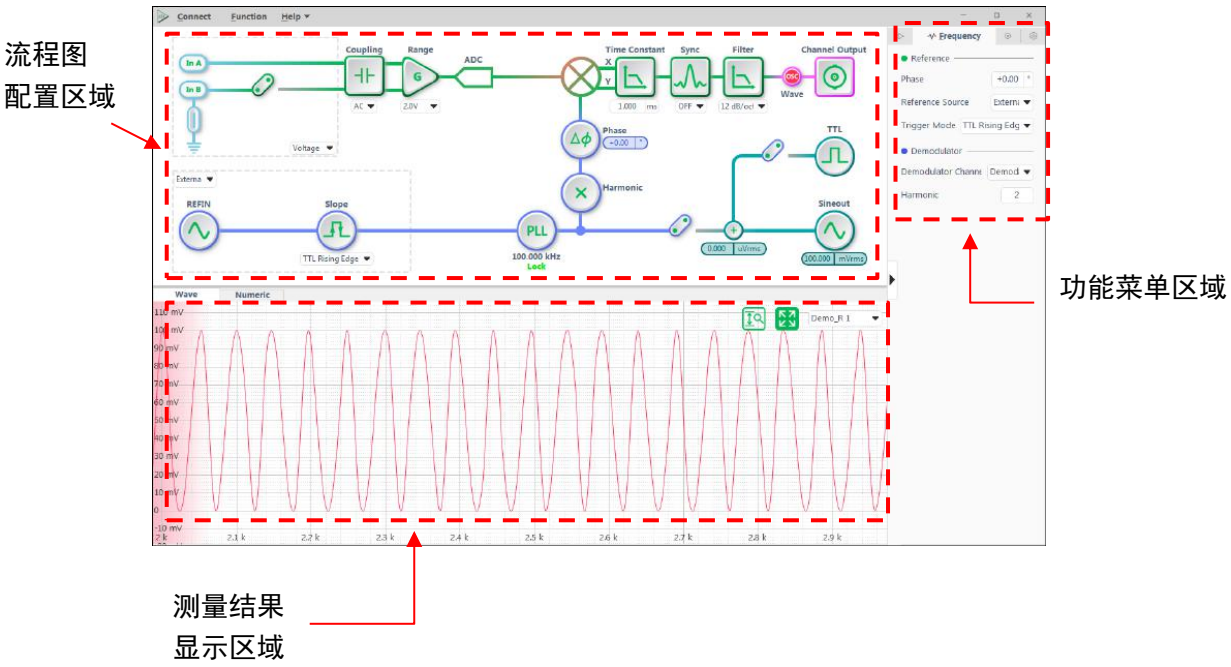


图19. LIA_console 区域位置

4. 2 连接上位机

OE2011/OE2021 随仪器附赠一个 U 盘，插入 PC 机，可以获取 LIA_console 软件。通过 USB 线或者网线连接 PC 电脑和 OE2011/OE2021 后，运行“LIA_Console.exe”文件，待软件运行后，等待若干秒，软件会自动识别连接到 PC 电脑的仪器，如图 20 所示：

图20. LIA_console 启动界面

通过点击 按钮，即会连接到仪器。连接成功后，LIA_console 界面会变为图 21 所示。

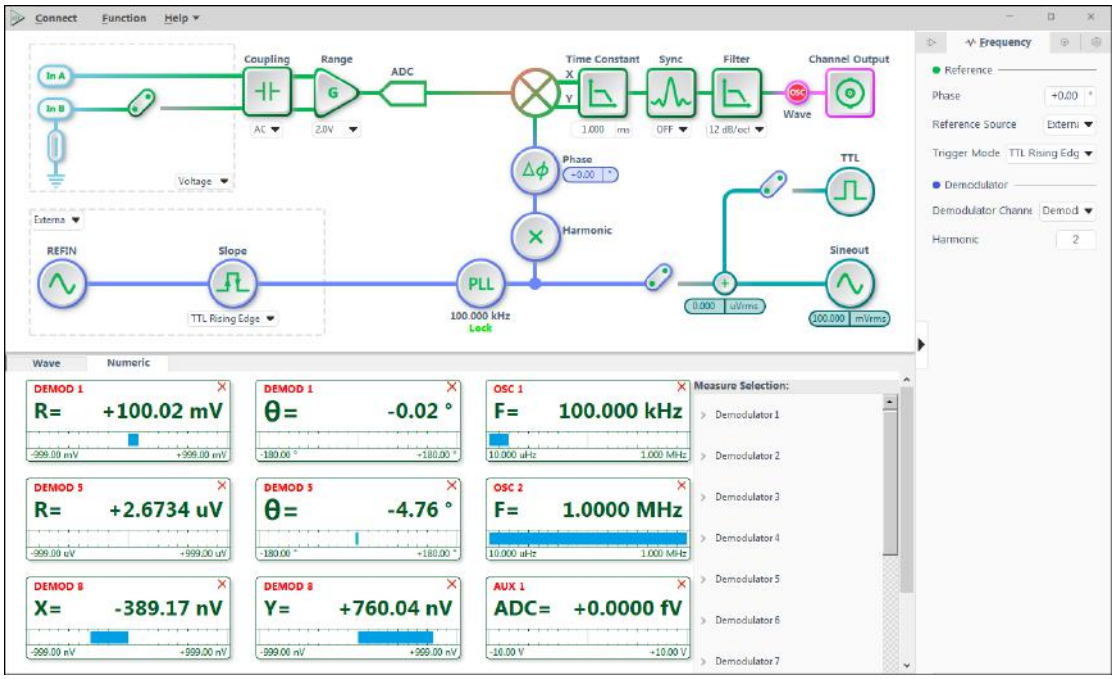


图21. LIA_console 界面

4. 3 软件使用范例

本使用范例将简单演示如何使用 OE2011/OE2021 PC 软件进行锁相放大器的参数配置以及 R、X、Y 和 θ 值的观察和记录。

首先需要按照前面 4.2 的说明，成功连接 OE2011/OE2021 与 PC 机，然后就可以开始进行配置了。

假设用户需要进行以下锁相放大器设置，并进行数据保存：

表2. 实例配置表

输入信号类型	单端电压输入
输入信号大小	40mV
输入耦合方式	AC
输入增益	50mV
参考信号输入	使用外部参考，1000 Hz
参考信号触发方式	TTL 上升沿触发
移相角度	0°

低通滤波器的时间常数	250 ms
滤波器陡降	24 dB/oct
数据采样率	1 s

要完成以上设置，具体操作步骤如下：

1．根据表 2 配置，在输入信号配置中修改输入信号类型、输入耦合方式和输入量程，其它选项默认，如图 22 所示：

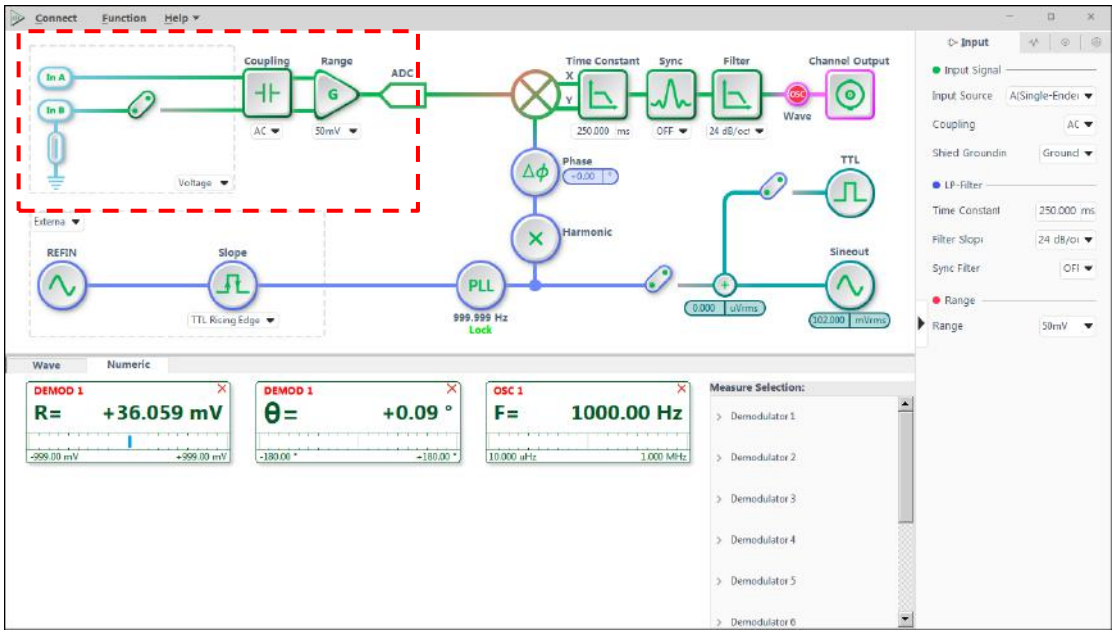


图22. 输入信号配置图

2. 根据表 2 配置，在参考信号配置区域选择参考信号源类型、外部参考和参考相位值，其它选项默认，如图 23 所示：

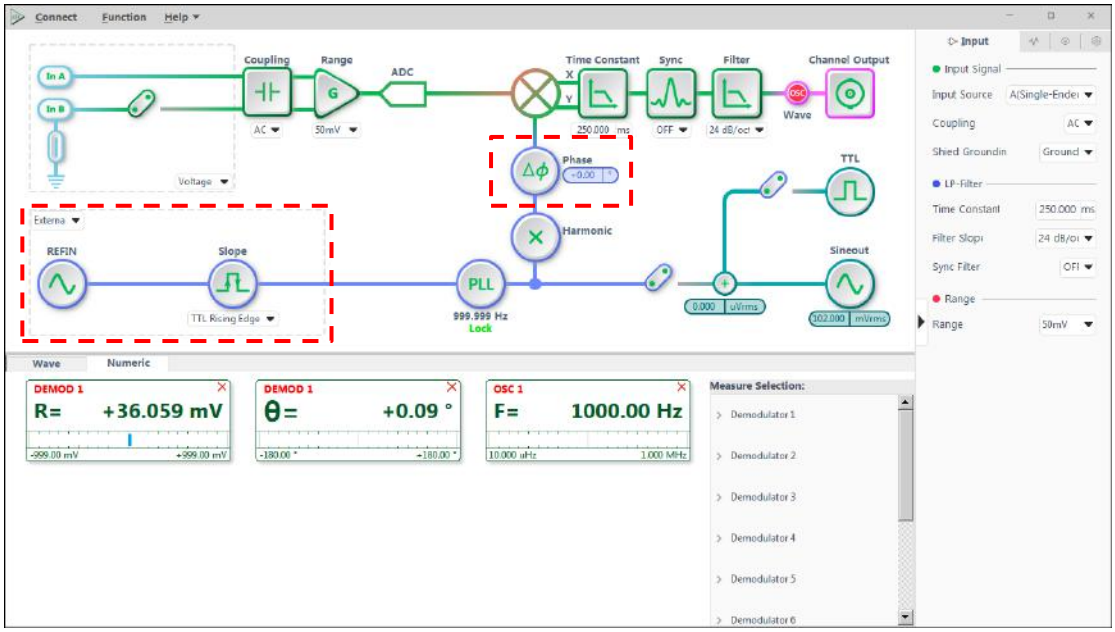


图23. 参考信号配置图

3．根据表 2，在滤波器配置区域选择好时间常数和滤波器陡降，其它选项默认，如图 24 所示，完成配置；

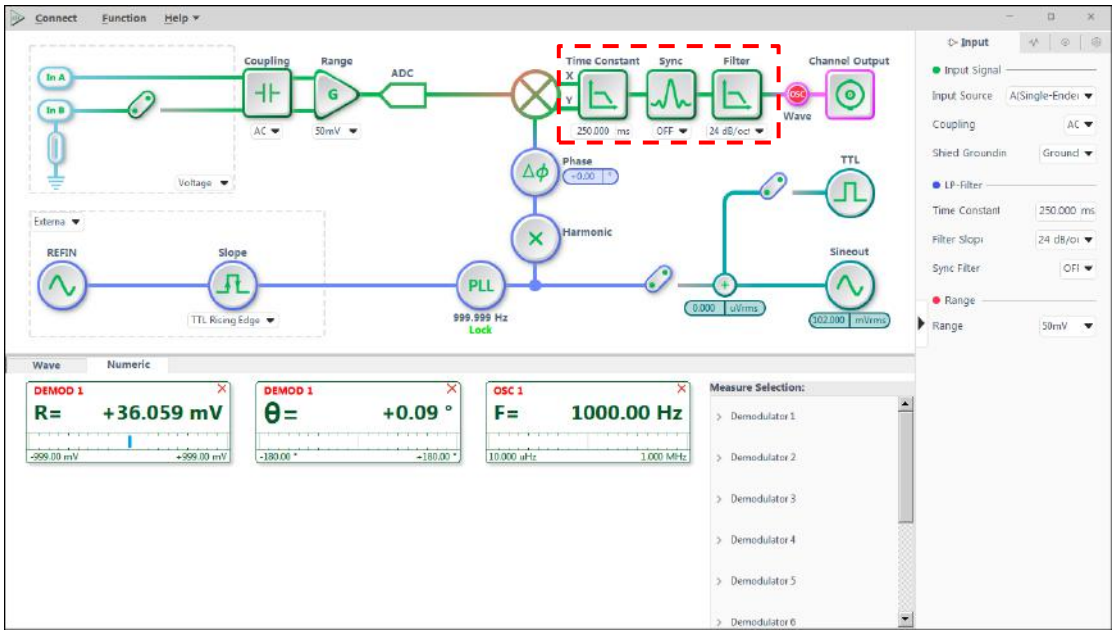


图24. 滤波器配置图

4. 若想配置其他解调器，如图 25 所示，配置解调器 2 的谐波阶数为 3，同时打开解调器 2 测量结果的显示，此时可以同时测量输入信号的基波和 3 次谐波分量。

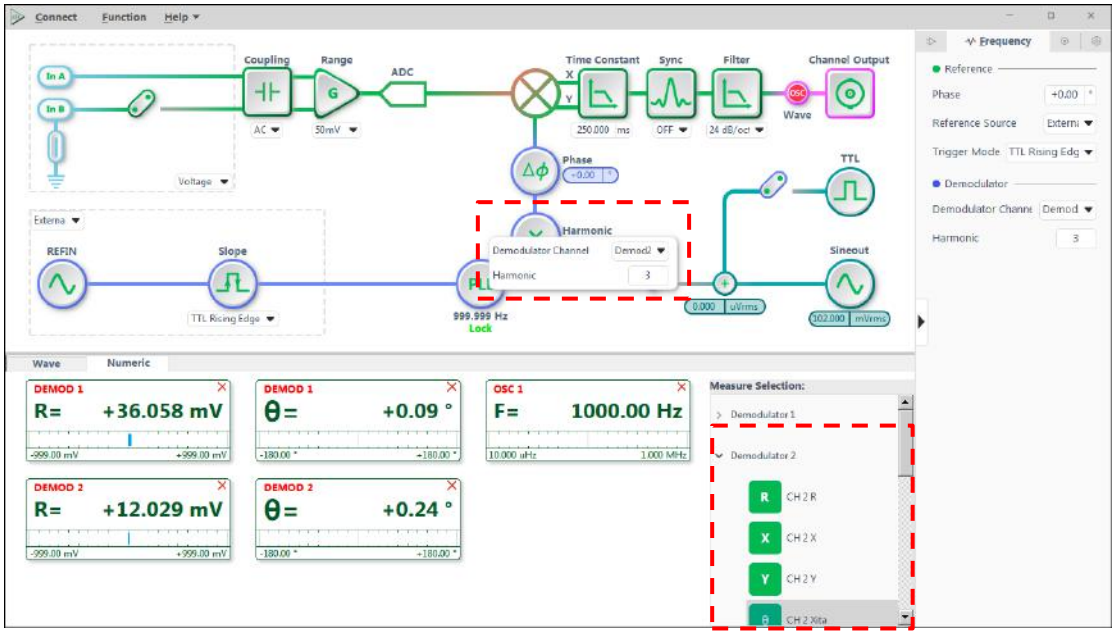


图25. 其他解调器配置图

5．以上步骤 1-4 已经根据要求配置完了 OE2011/OE2021，其它选项默认，此时可以开始进行数据的采集和保存了。

数据以 Excel 表格的形式保存在选定目录下，文件名为“SSI_Data_Record.csv”，储存有 8 个解调器的数据。

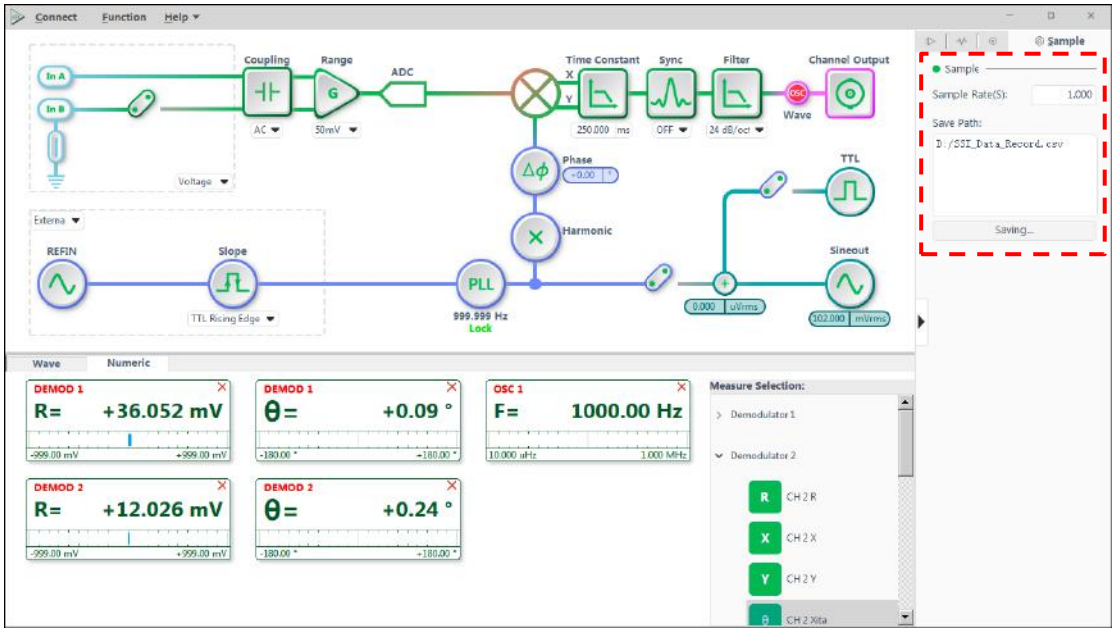
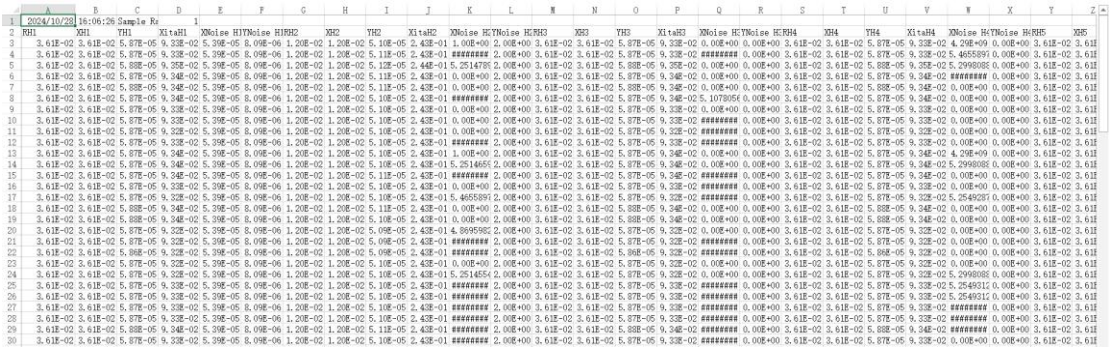


图26. 数据保存中

如图 26 所示，点击红框内按钮“Save Data”，当按钮被按下并显示“Saving...”，表示正在保存当前采集的数据。

打开保存到硬盘的文件后，数据格式如图 27 所示。



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
1	2024/10/28	16:06:26	Sample Ra	1																						
2	RH1	XH1	YH1	XitaH1	XNoise H1	YNoise H1	RH2	XH2	YH2	XitaH2	XNoise H2	YNoise H2	RH3	XH3	YH3	XitaH3	XNoise H3	YNoise H3	RH4	XH4	YH4	XitaH4	XNoise H4	YNoise H4	RH5	XH5
3	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.33E-02	5.39E-05	8.09E-06	1.20E-02	1.20E-02	5.10E-05	2.43E-01	1.00E+00	2.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.33E-02	0.00E+00	0.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.33E-02	4.29E+09	0.00E+00	3.61E-02	3.61
4	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.33E-02	5.39E-05	8.09E-06	1.20E-02	1.20E-02	5.11E-05	2.43E-01	########	2.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.33E-02	########	0.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.33E-02	5.4655891	0.00E+00	3.61E-02	3.61
5	3.61E-02	3.61E-02	5.88E-05	9.35E-02	5.39E-05	8.09E-06	1.20E-02	1.20E-02	5.12E-05	2.44E-01	5.2514786	2.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.88E-05	9.35E-02	0.00E+00	0.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.88E-05	9.35E-02	5.2998086	0.00E+00	3.61E-02	3.61
6	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.34E-02	5.39E-05	8.09E-06	1.20E-02	1.20E-02	5.11E-05	2.43E-01	0.00E+00	2.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.34E-02	0.00E+00	0.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.34E-02	########	0.00E+00	3.61E-02	3.61
7	3.61E-02	3.61E-02	5.88E-05	9.34E-02	5.39E-05	8.09E-06	1.20E-02	1.20E-02	5.11E-05	2.43E-01	0.00E+00	2.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.88E-05	9.34E-02	0.00E+00	0.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.88E-05	9.34E-02	0.00E+00	0.00E+00	3.61E-02	3.61
8	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.34E-02	5.39E-05	8.09E-06	1.20E-02	1.20E-02	5.10E-05	2.43E-01	########	2.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.34E-02	5.1078056	0.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.34E-02	0.00E+00	0.00E+00	3.61E-02	3.61
9	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.33E-02	5.39E-05	8.09E-06	1.20E-02	1.20E-02	5.10E-05	2.43E-01	0.00E+00	2.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.33E-02	0.00E+00	0.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.33E-02	0.00E+00	0.00E+00	3.61E-02	3.61
10	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.33E-02	5.39E-05	8.09E-06	1.20E-02	1.20E-02	5.10E-05	2.43E-01	0.00E+00	2.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.33E-02	########	0.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.33E-02	0.00E+00	0.00E+00	3.61E-02	3.61
11	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.32E-02	5.39E-05	8.09E-06	1.20E-02	1.20E-02	5.10E-05	2.43E-01	0.00E+00	2.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.32E-02	########	0.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.32E-02	0.00E+00	0.00E+00	3.61E-02	3.61
12	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.33E-02	5.39E-05	8.09E-06	1.20E-02	1.20E-02	5.10E-05	2.43E-01	########	2.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.33E-02	########	0.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.33E-02	0.00E+00	0.00E+00	3.61E-02	3.61
13	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.34E-02	5.39E-05	8.09E-06	1.20E-02	1.20E-02	5.10E-05	2.43E-01	1.00E+00	2.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.34E-02	0.00E+00	0.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.34E-02	4.29E+09	0.00E+00	3.61E-02	3.61
14	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.34E-02	5.39E-05	8.09E-06	1.20E-02	1.20E-02	5.10E-05	2.43E-01	5.2514659	2.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.34E-02	0.00E+00	0.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.34E-02	5.2998086	0.00E+00	3.61E-02	3.61
15	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.34E-02	5.39E-05	8.09E-06	1.20E-02	1.20E-02	5.11E-05	2.43E-01	########	2.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.34E-02	########	0.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.34E-02	0.00E+00	0.00E+00	3.61E-02	3.61
16	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.33E-02	5.39E-05	8.09E-06	1.20E-02	1.20E-02	5.10E-05	2.43E-01	0.00E+00	2.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.33E-02	########	0.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.33E-02	0.00E+00	0.00E+00	3.61E-02	3.61
17	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.32E-02	5.39E-05	8.09E-06	1.20E-02	1.20E-02	5.10E-05	2.43E-01	5.4655891	2.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.32E-02	########	0.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.32E-02	5.2549291	0.00E+00	3.61E-02	3.61
18	3.61E-02	3.61E-02	5.88E-05	9.34E-02	5.39E-05	8.09E-06	1.20E-02	1.20E-02	5.11E-05	2.43E-01	0.00E+00	2.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.88E-05	9.34E-02	0.00E+00	0.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.88E-05	9.34E-02	0.00E+00	0.00E+00	3.61E-02	3.61
19	3.61E-02	3.61E-02	5.88E-05	9.34E-02	5.39E-05	8.09E-06	1.20E-02	1.20E-02	5.10E-05	2.43E-01	0.00E+00	2.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.88E-05	9.34E-02	0.00E+00	0.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.88E-05	9.34E-02	0.00E+00	0.00E+00	3.61E-02	3.61
20	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.32E-02	5.39E-05	8.09E-06	1.20E-02	1.20E-02	5.09E-05	2.43E-01	4.8695985	2.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.32E-02	0.00E+00	0.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.32E-02	0.00E+00	0.00E+00	3.61E-02	3.61
21	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.32E-02	5.39E-05	8.09E-06	1.20E-02	1.20E-02	5.09E-05	2.43E-01	########	2.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.32E-02	########	0.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.32E-02	0.00E+00	0.00E+00	3.61E-02	3.61
22	3.61E-02	3.61E-02	5.86E-05	9.32E-02	5.39E-05	8.09E-06	1.20E-02	1.20E-02	5.09E-05	2.43E-01	########	2.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.86E-05	9.32E-02	########	0.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.86E-05	9.32E-02	0.00E+00	0.00E+00	3.61E-02	3.61
23	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.32E-02	5.39E-05	8.09E-06	1.20E-02	1.20E-02	5.10E-05	2.43E-01	0.00E+00	2.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.32E-02	0.00E+00	0.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.32E-02	0.00E+00	0.00E+00	3.61E-02	3.61
24	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.32E-02	5.39E-05	8.09E-06	1.20E-02	1.20E-02	5.10E-05	2.43E-01	5.2514554	2.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.32E-02	0.00E+00	0.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.32E-02	5.2998086	0.00E+00	3.61E-02	3.61
25	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.33E-02	5.39E-05	8.09E-06	1.20E-02	1.20E-02	5.10E-05	2.43E-01	########	2.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.33E-02	########	0.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.33E-02	5.2549312	0.00E+00	3.61E-02	3.61
26	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.33E-02	5.39E-05	8.09E-06	1.20E-02	1.20E-02	5.10E-05	2.43E-01	########	2.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.33E-02	########	0.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.33E-02	5.2549312	0.00E+00	3.61E-02	3.61
27	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.33E-02	5.39E-05	8.09E-06	1.20E-02	1.20E-02	5.10E-05	2.43E-01	########	2.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.33E-02	########	0.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.33E-02	########	0.00E+00	3.61E-02	3.61
28	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.33E-02	5.39E-05	8.09E-06	1.20E-02	1.20E-02	5.10E-05	2.43E-01	########	2.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.33E-02	########	0.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.33E-02	########	0.00E+00	3.61E-02	3.61
29	3.61E-02	3.61E-02	5.88E-05	9.34E-02	5.39E-05	8.09E-06	1.20E-02	1.20E-02	5.11E-05	2.43E-01	########	2.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.88E-05	9.34E-02	########	0.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.88E-05	9.34E-02	########	0.00E+00	3.61E-02	3.61
30	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.33E-02	5.39E-05	8.09E-06	1.20E-02	1.20E-02	5.10E-05	2.43E-01	########	2.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.33E-02	########	0.00E+00	3.61E-02	3.61E-02	5.87E-05	9.33E-02	0.00E+00	0.00E+00	3.61E-02	3.61

图27. SSI_Data_Record.csv 文件格式

5. 界面与上位机功能

OE2011/OE2021 主菜单位于前面板控制部分的 MENU。MENU 主菜单共分为：[SIGNAL INPUT]、[OSC REF]、[DEMOD FILTER]、[DEMOD REF]、[DISPLAY]、[SIGNAL OUTPUT]、[AUTO SET]、[CHANNEL OUTPUT]、[SYSTEM]和[AUX OUTPUT]十个子菜单。通过按每个按钮可切换到相应的子菜单界面。

OE2011/OE2021 也可以通过上位机进行控制和读取数据。

5.1 [SIGNAL INPUT]子菜单

5.1.1 前面板界面配置

在前面板菜单栏中选择[SIGNAL INPUT]进入。本菜单为信号输入通道的硬件配置，如图 28 右边栏所示：

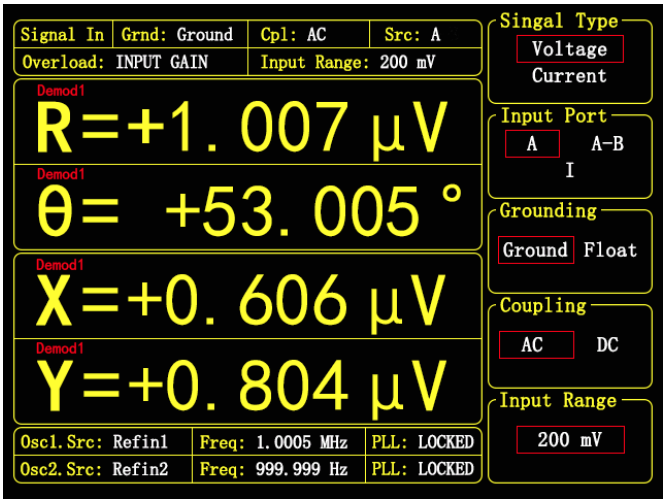


图28. [INPUT/FILTERS]子菜单

此子菜单中包括<Signal Type>、<Input Port>、<Grounding>、<Coupling>和<Input Range>五种功能设置：

- <Signal Type>：输入模式设置

  <Voltage>：电压信号输入模式。

  <Current>：电流信号输入模式。

- <Input Port>：输入模式设置

  <A> ：单端电压信号输入模式。

  <A-B> ：差分电压信号输入模式。选择此模式时，将双信号的一端由接口 A 输入，另一端由接口 B 输入。

  <I> ：单端电流信号输入模式。

值得注意的是，<Signal Type>和<Input Port>是互相关联的，当<Signal Type>设置为<Voltage>模式，则<Input Port>只能设置<A>和<A-B>模式，当<Signal Type>设置为

<Current>模式，<Input Port>只能设置为<I>模式。

☆注意：无论使用电压还是电流档位，最大输入信号的幅值不能超过<Input Range>的设置。

- <Grounding>：输入屏蔽层接地设置

<Float> ：A、B 输入接口外壳与仪器地通过 10kΩ 电阻隔离。

<Ground>：A、B 输入接口外壳与仪器地（仪器地已短接在大地---市电 GND 上）通过 10Ω 电阻短接。

一般认为信号灌入电流的能力不强（不致烧毁仪器接口芯片），或者确保信号地与仪器地处于同一地电平，可设置为<Ground>，让信号地与系统地短接在一起，防止信号地过于浮空带来的信号漂动。当信号地与仪器地绝对电势相差较大，且信号地灌入电流能力很强时，使用<Float>选项，浮空信号地，同时起限流保护作用。

☆当测量微弱信号时（<1mV），建议使用 Ground 模式，但前提要保证信号地与仪器地是同一地电平的。

- <Coupling>：输入耦合设置

<AC> ：交流耦合输入。交流耦合的截止频率在 0.16Hz，用于阻隔输入信号中的直流成分，如果信号频率在 10 Hz 以上建议使用<AC>交流耦合。

<DC> ：直流耦合输入。直流耦合不阻隔任何输入信号，如果信号频率低于 10 Hz 时建议使用<DC>直流耦合。但要注意输入信号的偏置量而导致的信号溢出。

- <Input Range>：输入量程设置

当<Signal Type>设置为<Voltage>模式时， <Input Range>的允许配置如下：

<5 V> ：允许输入信号的最大电压有效值为 5Vrms。
<1 V> ：允许输入信号的最大电压有效值为 1Vrms。
<200mV>：允许输入信号的最大电压有效值为 200mVrms。
<50mV> ：允许输入信号的最大电压有效值为 50mVrms。
<10mV> ：允许输入信号的最大电压有效值为 10mVrms。
<2 mV> ：允许输入信号的最大电压有效值为 2mVrms。
<1 mV> ：允许输入信号的最大电压有效值为 1mVrms。

当<Signal Type>设置为<Current>模式时， <Input Range>的允许配置如下：

<5 mA> ：允许输入信号的最大电流有效值为 5mArms。
<500μA> ：允许输入信号的最大电流有效值为 500μArms。
<50 μA> ：允许输入信号的最大电流有效值为 50μArms。
<5 μA> ：允许输入信号的最大电流有效值为 5μArms。
<500nA> ：允许输入信号的最大电流有效值为 500nArms。
<50 nA> ：允许输入信号的最大电流有效值为 50nArms。
<500pA> ：允许输入信号的最大电流有效值为 500pArms。

对于一般情况下的测量时，增益选择以监控栏里没有 overload 溢出为基准。在不溢出的前提下，选择更接近信号幅值的量程，可以提高测量结果稳定度和精度。

当使用自动设置增益功能<Auto Range>时，系统会根据输入信号的 R 值自动调整测量所需要的最合适的输入量程，以保证测量精度。

5.1.2 上位机配置

如图 29 上位机的红框所示配置区域为[SIGNAL INPUT]的配置区域，用户可以在此区域

配置信号输入通道，<Signal Type>、<Input Port>、<Grounding>、<Coupling>和<Input Range>的配置信息均可在红框里修改确认。

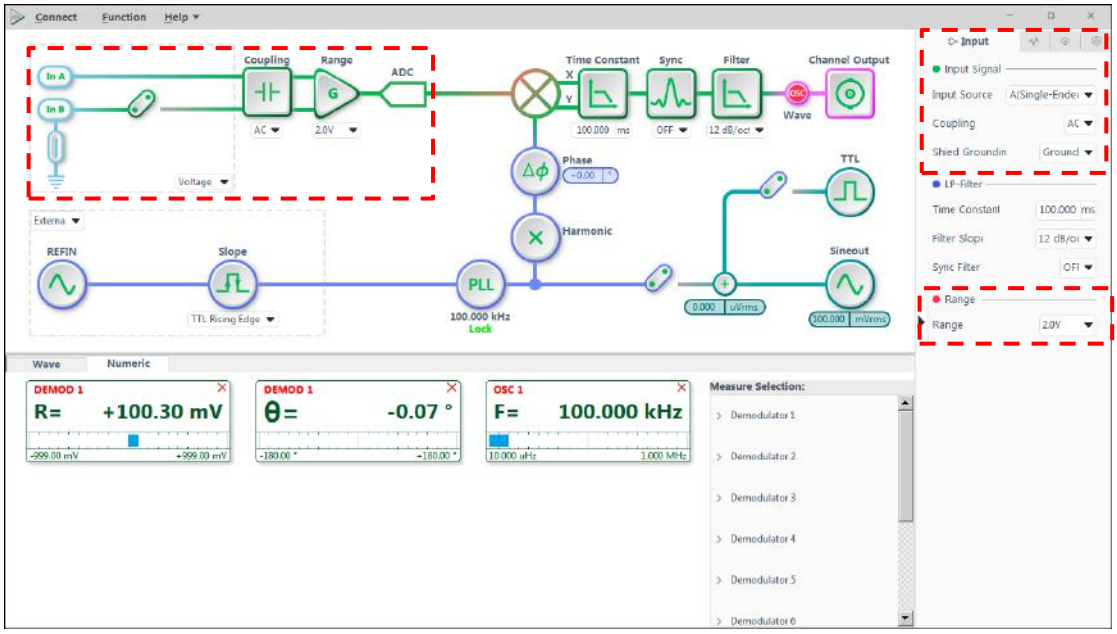


图29. [SIGNAL INPUT]的配置区域

5.2 [OSC REF]子菜单

5.2.1 前面板界面配置

在前面板的菜单栏选择[OSC REF]子菜单进入，本菜单为 2 路参考输入通道的硬件配置以及 2 个振荡器 OSC1、OSC2 的模式配置，选择不同的配置会有不同的界面，如图 30、图 31 所示：

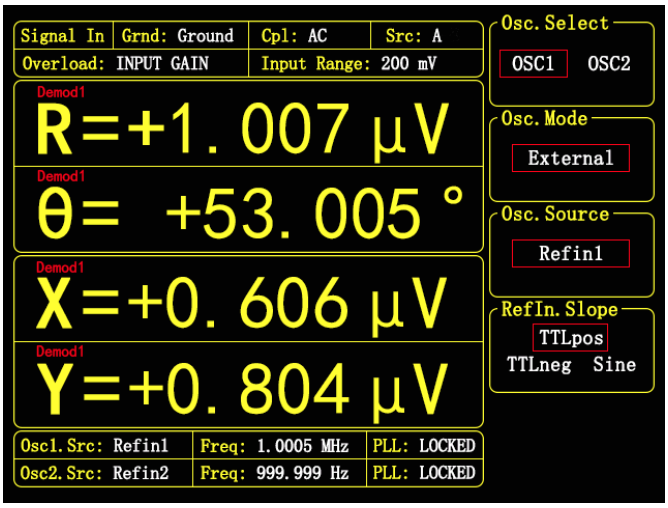


图30. [OSC REF]子菜单-<External>

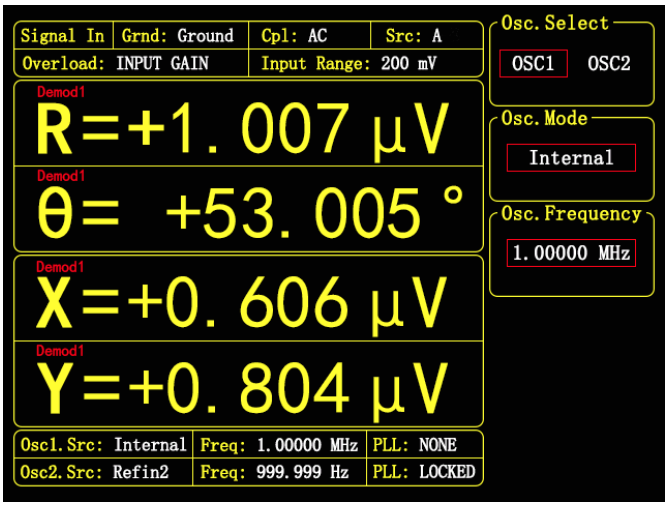


图31. [OSC REF]子菜单-<Internal>

此子菜单中包括<Osc.Select>、<Osc.Mode>、<Osc.Source>、<RefIn.Slope>、<Osc.Frequency>五种功能设置：

- <Osc.Select>：OSC 通道选择

通过按键可以切换<OSC1>和<OSC2>两个振荡器的参数展现与配置，如切换到<OSC1>，则<Osc.Mode>、<Osc.Source>、<RefIn.Slope>、<Osc.Frequency>的配置都是<OSC1>的当前配置，此时改变配置，不影响<OSC2>的配置。

- <Osc.Mode>: 振荡器的模式设置

<External> ：外部模式。OE2011/OE2021 将当前振荡器设置为外部模式，此时 REF-IN BNC 输入的参考信号连接到振荡器，在仪器内部进行锁相，由于锁相环的作用，振荡器的输出信号会实时跟踪外部参考信号。此时的界面如图 30 所示，可以对<Osc.Source>进行设置。

<Internal> ：内部模式。OE2011/OE2021 将当前振荡器设置为内部模式，此设置下振荡器将直连到仪器的内部晶振，由仪器自身产生参考信号。REF-IN BNC 输入信号将不起作用。此时的界面如图 31 所示，可以对<Osc.Frequency>进行设置。

- <Osc.Source>：参考信号源设置

<Refin1/Refin2> ：将振荡器外部模式时的参考输入源设置为 Refin1 或 Refin2，此时可通过<Ref.Slope>设置 Refin 信号的波形类别。要注意的是，<Refin1 >是<OSC1>的专用参考接口，而<Refin2>是<OSC2>的专用参考接口。

<Sigin1> ：将振荡器外部模式时的参考输入源设置为 SIGNAL IN 接口。

<Auxin1>：将振荡器外部模式时的参考输入源设置为 AUX IN 1 接口。

<Auxin2>：将振荡器外部模式时的参考输入源设置为 AUX IN 2 接口。

<Auxin3>：将振荡器外部模式时的参考输入源设置为 AUX IN 3 接口。

<Auxin4>：将振荡器外部模式时的参考输入源设置为 AUX IN 4 接口。

<Trigin> ：将振荡器外部模式时的参考输入源设置为 TRIGGER IN 接口。

- <Ref.Slope>：外部参考信号类型设置

当<Osc.Mode>选择<External>且<Osc.Source>选择< Refin1/2>时可进行此项设置，根据外部参考信号的类型选择对应的信号类型。

<TTLpos>：外部输入信号为方波时选择此项，此时对参考信号的上升沿进行锁相。

<TTLneg>：外部输入信号为方波时选择此项。此时对参考信号的下降沿进行锁相。

<Sine> ：外部输入信号为正弦波时选择此项。此时对参考信号上升沿的过零点进行锁相。

当输入参考信号为 TTL 逻辑电平时，建议选择 TTL 触发。应当注意，当输入 REF-IN 的参考信号虽然是方波，但电平值不满足 TTL 逻辑高低电平阈值条件时，可能得不到稳定的触发，此时可能得不到预期的测量结果，故此时推荐选用 SINE 触发。此外，对特别低的频率(<1 Hz)时，需使用 TTL 参考。

当输入 REF-IN 的参考信号为正弦信号时，建议选用该 SINE 触发。SINE 触发是在系统内部对 REF IN 输入进行精密整形后再检测频率、相位信息。

另外，无论是<TTL>触发还是<SINE>触发，系统对其信号占空比（Duty Cycle）没有要求，但推荐使用常规 50%占空比为宜。

- <Ref.Frequency>：内部参考信号频率设置

当<Osc.Source>选择<Internal>时可进行此项设置，频率范围为 10 μHz 到 250kHz（仅 OE2011，OE2021 为 1.5MHz），默认 1.000 kHz。频率设置可以通过键盘输入，频率分辨率最小为 1 nHz。另外还可以在选中<Ref.frequency>时，通过在[ARROW]区域的上下左右四个方向键，单独改变其中一个位的数。如把 1000Hz 快速调整为 1100Hz，先选中<Ref.frequency>按键，然后通过[→]和[←]按键，把光标移动到百位的位置，再通过[↑]和[↓]按键把百位的数字改成 1，再按<Enter>按键确认，即可完成操作。如图 32 所示。

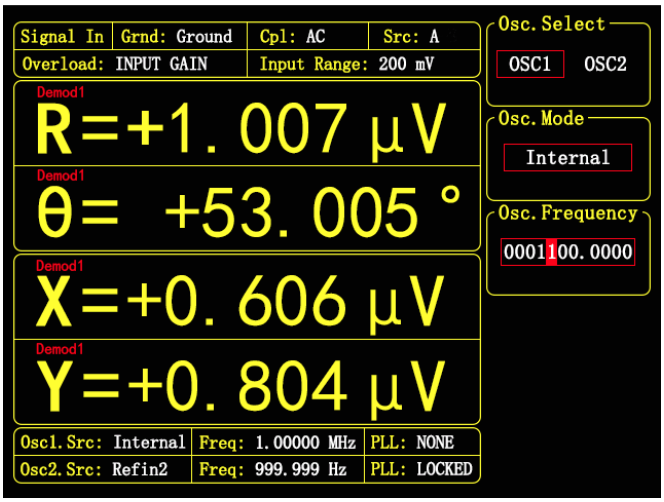


图32. 通过[ARROW]调整频率示意图

5.2.2 上位机配置

如图 33 上位机的红框所示配置区域为[OSC REF]的配置区域，用户可以在此区域设置参考输入通道的硬件配置以及内部振荡器的配置，<Osc.Select>、<Osc.Mode>、<Osc.Source>、<RefIn.Slope>和<Osc.Frequency>的配置信息均可在红框里修改确认。

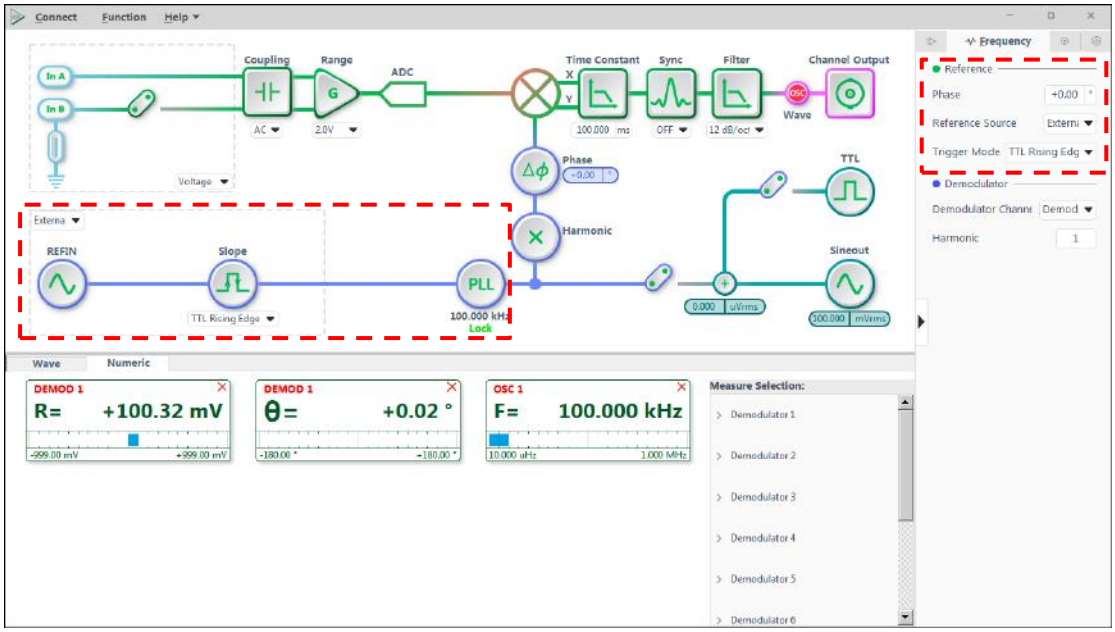


图33. [OSC REF]的配置区域

5.3 [DEMOD FILTER]子菜单

5.3.1 前面板界面配置

在前面板菜单栏中选择[DEMOD FILTER]进入。本菜单为信号输入通道的硬件配置，如图 34 右边栏所示：

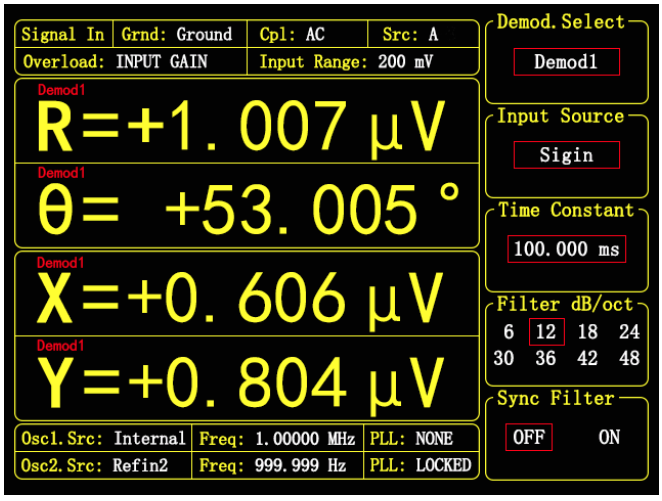


图34. [DEMOD FILTER]子菜单

此子菜单中包括<Demod.Select>、<Input Source>、<Time Constant>、<Filter dB/oct>和<Sync Filter>五种功能设置：

- <Demod.Select>：解调器通道选择设置

通过旋钮和键盘 ARROW 区可以切换<Demod1>至<Demod8>的 8 个解调器参数展现与配置，如切换到<Demod1>，则<Input Source>、<Time Constant>、<Filter dB/oct>、<Sync Filter>的配置都是<Demod1>的当前配置，此时改变配置，不影响其他解调器的配置。

- <Input Source>：解调器信号输入源选择设置

<Sigin> ：将当前解调器的信号输入源设置为 SIGNAL IN 接口。
<Auxin1> ：将当前解调器的信号输入源设置为 AUX IN 1 接口。
<Auxin2> ：将当前解调器的信号输入源设置为 AUX IN 2 接口。
<Auxin3> ：将当前解调器的信号输入源设置为 AUX IN 3 接口。
<Auxin4> ：将当前解调器的信号输入源设置为 AUX IN 4 接口。
<X-Demod1> ：将当前解调器的信号输入源设置为解调器 Demod1 的输出 X 值。
<Y-Demod1> ：将当前解调器的信号输入源设置为解调器 Demod1 的输出 Y 值。
<R-Demod1> ：将当前解调器的信号输入源设置为解调器 Demod1 的输出 R 值。
<Theta-Demod1> ：将当前解调器的信号输入源设置为解调器 Demod1 的输出 Theta 值。
<X-Demod5> ：将当前解调器的信号输入源设置为解调器 Demod5 的输出 X 值。
<Y-Demod5> ：将当前解调器的信号输入源设置为解调器 Demod5 的输出 Y 值。
<R-Demod5> ：将当前解调器的信号输入源设置为解调器 Demod5 的输出 R 值。
<Theta-Demod5> ：将当前解调器的信号输入源设置为解调器 Demod5 的输出 Theta 值。

当解调器的信号输入源设置为<X-Demod1>至<Theta-Demod5>时，此时 OE2011/OE2021 将进行级联解调模式，可以对调制信号进行二次解调，还原载波和调制波信号。

☆注意：Demod1 只能选择 Sigin 作为输入源。

- <Time Constant>：时间常数设置

时间常数设置范围为 100 ns 到 3 k s，通过键盘输入数值，或者通过 ARROW 区进行修改。

时间常数越长，等效噪声带宽越小，系统测量响应的时间越长，测量的精度也越高。

- <Filter dB/oct>：低通滤波器陡降设置

<6 dB/oct> ：一阶低通滤波器，陡降 6 dB/oct。
<12 dB/oct> ：二阶低通滤波器，陡降 12 dB/oct。
<18 dB/oct> ：三阶低通滤波器，陡降 18 dB/oct。
<24 dB/oct> ：四阶低通滤波器，陡降 24 dB/oct。
<30 dB/oct> ：五阶低通滤波器，陡降 30 dB/oct。
<36 dB/oct> ：六阶低通滤波器，陡降 36 dB/oct。
<42 dB/oct> ：七阶低通滤波器，陡降 42 dB/oct。
<48 dB/oct> ：八阶低通滤波器，陡降 48 dB/oct。

在同样的测量准确度下，使用更高的滤波器陡降可以降低时间常数，使得测量响应更快。具体的时间常数和滤波器陡降搭配，必须根据实际情况来选择，一个判定的准则是只要对测量结果的稳定度满意，此时的时间常数和滤波器陡降就不需要设置太大，以免等待时间过长。当然，若想结果更加平稳，可以适当增大时间常数和滤波器陡降。

- <Sync Filter>：同步滤波器设置

< OFF > ：关闭同步滤波器。
< ON > ：开启同步滤波器。当信号频率低于 10000 Hz 时可以开启同步滤波器。低通

滤波器在输入信号频率较低时无法或需长时间才能得到稳定的结果，此时可借助于此同步滤波器改善效果。效果如图 35 所示。

同步滤波器可以有效去除参考频率及其倍频的信号，降低对低通滤波器的要求。

☆注：同步滤波器开启时，<Filter db/oct> 必须为<18 dB/oct >以上才能真正起作用！

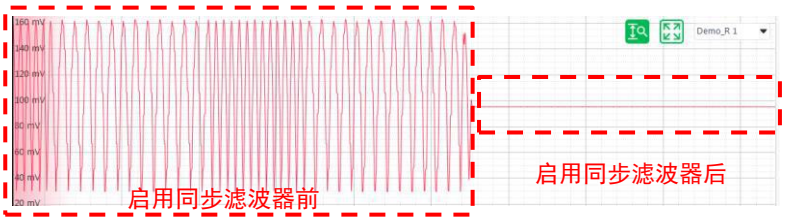


图35. 开启同步滤波器效果图

5. 3. 2 上位机配置

如图 36 上位机的红框所示配置区域为[DEMOD FILTER]的配置区域，用户可以在此区域设置解调器的相关配置，<Input Source>、<Time Constant>、<Filter dB/oct>和<Sync Filter>的配置信息均可在红框里修改确认。

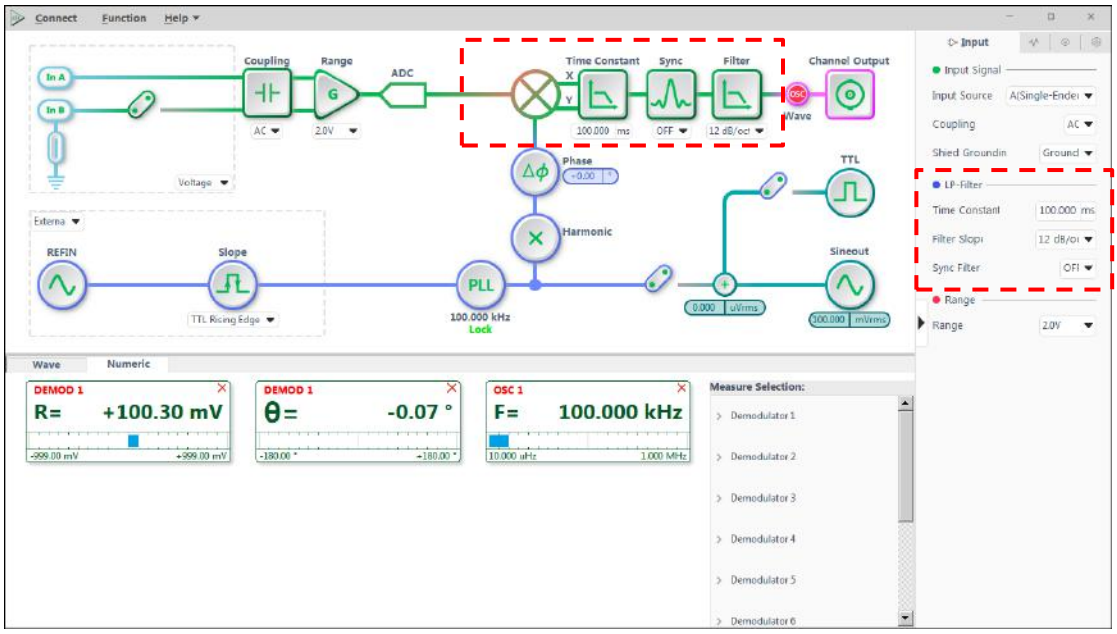


图36. [DEMOD FILTER]的配置区域

5.4 [DEMOD REF] 子菜单

5.4.1 前面板界面配置

在前面板的菜单栏选择[DEMOD REF]子菜单进入，本菜单为解调器参考基准源的配置菜单，如图 37 右边栏所示：

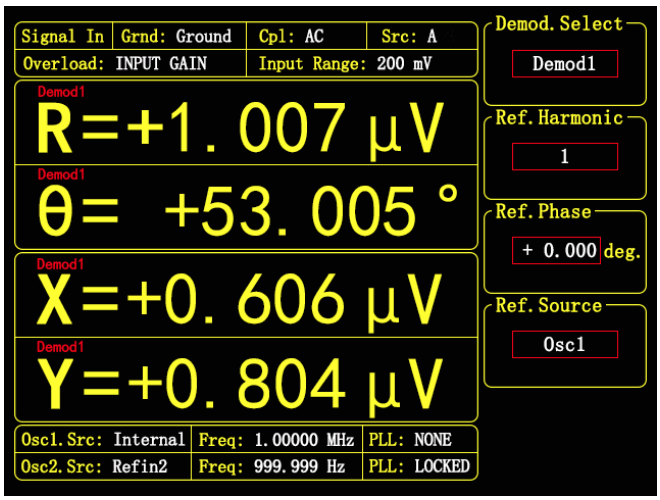


图37. [DEMOD REF]子菜单

此子菜单中包括< Demod.Select>、<Ref.Harmonic>、<Ref.Phase>、<Ref.Source>、<Frequency Set>和<Equation Set>等功能设置：

- <Demod.Select>：解调器通道选择设置

通过旋钮和键盘 ARROW 区可以切换<Demod1>至<Demod8>的 8 个解调器参数展现与配置，如切换到<Demod1>，则<Input Source>、<Time Constant>、<Filter dB/oct>、<Sync Filter>的配置都是<Demod1>的当前配置，此时改变配置，不影响其他解调器的配置。

- <Ref.Harmonic >：解调器参考基准的谐波阶数设置

其设置范围是 1~10000 的整数。通过数字键盘输入所需测量的谐波阶数，默认显示 1，表示检测 1 阶谐波(即基波)。<Ref.Harmonic >谐波阶数设置有效的条件是（Harmonic*参考信号频率）≤250kHz（仅 OE2011，OE2021 为 1.5MHz）。一旦超过上限频率时，系统并不会干预设置值，但是测量结果会出错，需要用户自己把控谐波的设置。

例如输入信号是频率为 1kHz 的方波时，假定它的峰峰值为 A，设置<Ref.Harmonic >值分别为 1、2、3、4、5、6……时，将预期得到 R 值为 0.45A、0、0.15A、0、0.09A、0……，而这个序列正是方波信号傅立叶级数的系数序列的 A 倍。

☆注：多个解调器测量结果同时显示需要在[DISPLAY]子菜单中的<Display Mode>选项中选择<Full>，详细可见[DISPLAY]子菜单。

- <Ref.Phase>: 解调器参考基准的相位偏移量设置

通过数字键盘输入可设置 PSD 算法两路正交参考信号的相移角度，移相精度为 0.01°，输入范围为-180°至+180°。

对于相位，必须有一个基准或者参考才有意义，系统中，我们默认以内部振荡器上升沿的过零点作为相位基准，其余相位值都是基于此基准。当内部振荡器的信号源设置为 REF IN 时，内部振荡器会通过高精度锁相环锁定相位后，此时系统的相位基准会跟踪到

REF IN 信号，满足锁相的需求。相位偏移量会影响解调器参考基准相对于内部振荡器的相位偏差，如图 38 所示，如果不需要相位偏移，则保持<Ref.Phase>为 0°，此时解调器参考基准于内部振荡器保持同相。

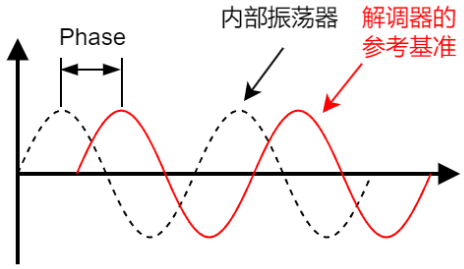


图38. 相位偏移量对于参考基准的影响

- <Ref.Source>：解调器参考基准源设置

<Osc1> ：设置当前解调器的参考基准源为内部振荡器 OSC1。

<Osc2> ：设置当前解调器的参考基准源为内部振荡器 OSC2。

<Frequency> ：设置当前解调器的参考基准源为为任意频率。此模式界面如图 39 所示。

<Equation> ：设置当前解调器的参考基准源为公式组合解调。此模式界面如图 40 所示。此时可以点击<Menu Enter>进入二级菜单设置公式组合。

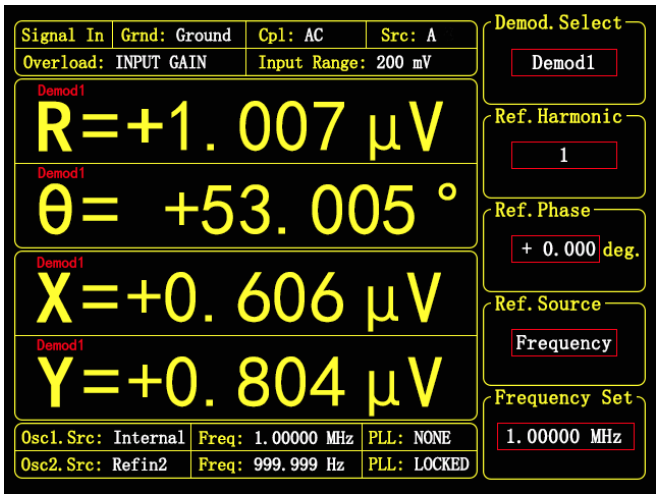


图39. <Frequency>模式界面

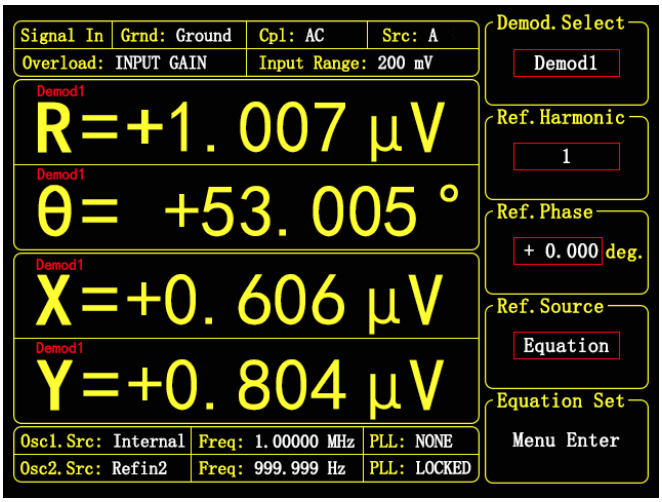


图40. <Equation>模式界面

- <Frequency Set>：解调器的参考频率设置

当<Ref.Source>设置为<Frequency>时，可以设置此项。此项设置与[OSC REF]的<Ref.Frequency>的规则相同。<Frequency>设置为某个频率时，解调器即以该频率为参考基准频率来解调信号。

在输入信号包含多个频率信息，而用户需要分别提取出来的时候，这个模式尤为有用，8 个解调器可以分别设置不同的解调频率，可同时解调 8 个频率信息。

- <Equation Set>：公式组合参考设置

当<Ref.Source>设置为<Equation>时，可以设置此项。此时可以点击<Menu Enter>进入二级菜单设置公式组合，如图 41 所示。<Equation>的计算公式为：

$$\text{Equation} = A \times F_{OSC} + B \times F$$

其中 A、B 为整数，可设置-10000 至+10000 的范围；F_{OSC} 可选择 OSC1 或者 OSC2 的频率结果，F 可选择 OSC1 或者 OSC2 的频率结果，或者设定为任意频率。

假如 Equation 计算结果是 1500Hz，那么该解调器即以 1500Hz 为参考频率进行相敏检测算法。本模式在 AM、FM 解调，解调和频差频中有较好的效果。

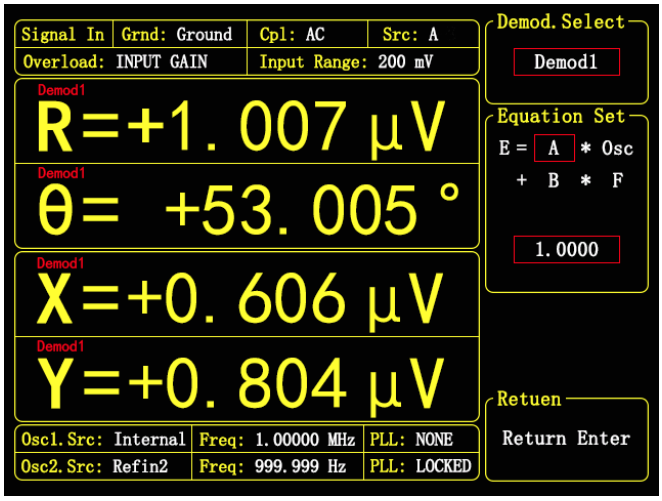


图41. <Equation>二级菜单设置界面

5.4.2 上位机配置

如图 42 上位机的红框所示配置区域为[DEMOD REF]的配置区域，用户可以在此区域设置解调器参考基准源的相关配置，<Ref.Harmonic>、<Ref.Phase>、<Ref.Source>、<Frequency Set>和<Equation Set>的配置信息均可在红框里修改确认。

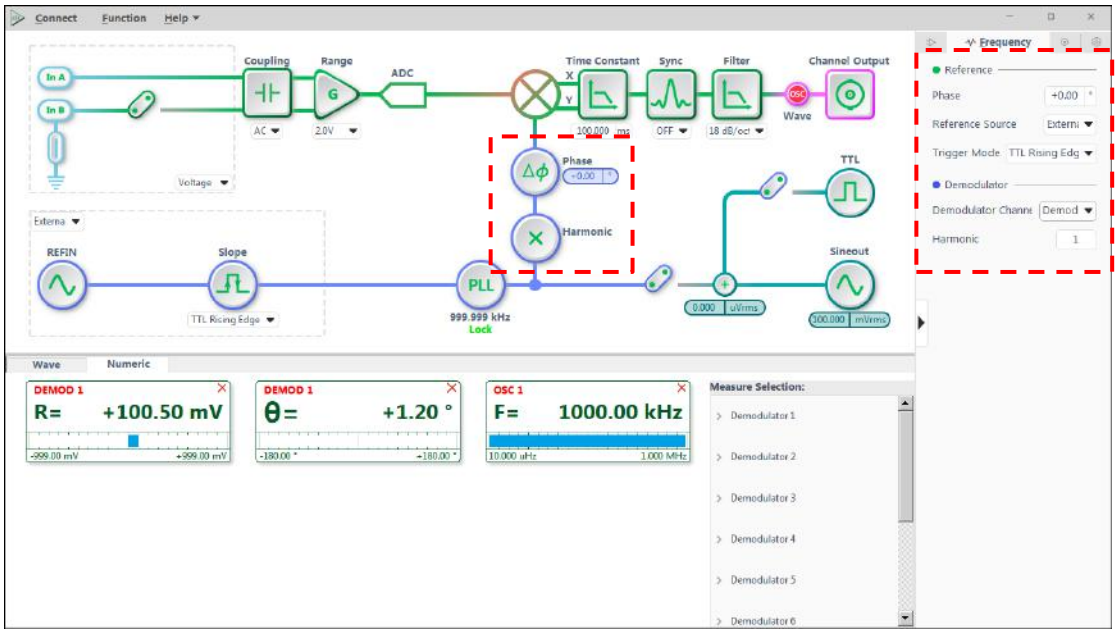


图42. [DEMOD REF]的配置区域

5.5 [DISPLAY] 子菜单

5.5.1 前面板界面配置

在前面板的 MENU 菜单栏选择[DISPLAY]子菜单进入，如图 43 右边栏所示：

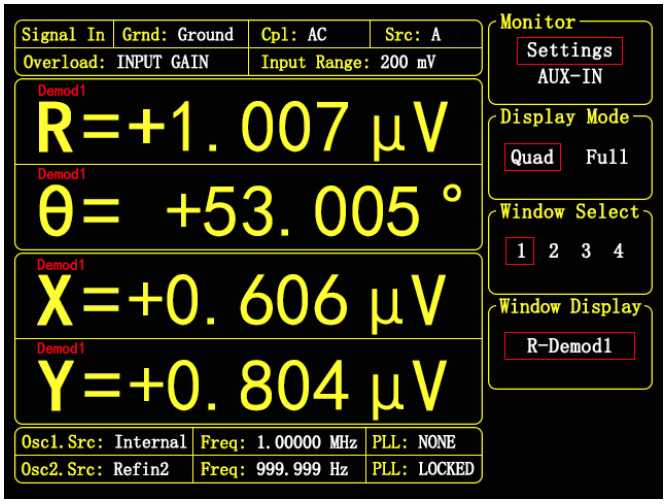


图43. [DISPLAY]子菜单

[DISPLAY]子菜单主要包括 <Monitor>、<Display Mode>、<Window Select>、<Window Display>和<Full Window>五种功能设置，可以通过子菜单旁边对应的软键进行选择、设置。

- <Monitor>：状态栏显示设置

<Settings> ：在液晶屏左上方状态栏内显示 <Input Source>、<Overload>等多项当前设定的参数和状态。

<AUX-IN> ：在液晶屏左上方状态栏内显示当前后面板 AUX-IN 的四个 BNC 接口的实时输入幅值。界面如图 44 所示：

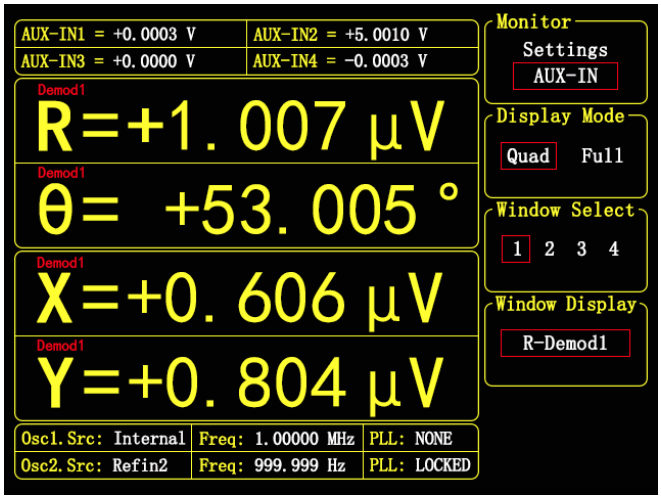


图44. <AUX-IN>界面

- <Display Mode>：动态区域显示模式设置

<Display Mode>选项主要用于设置数据栏的显示类型，有两种类型：

<Quad> ：四分栏显示模式，同时显示 4 个测量数据。这个模式如图 43 所示。

<Full> ：所有测量数据在一个窗口内显示的模式。这个模式如图 45 所示。

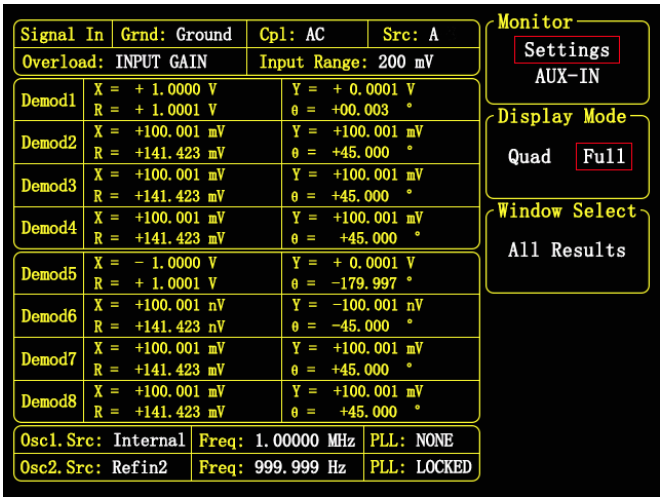


图45. <Full>显示模式

- <Window Select>&<Window Display>：分栏窗口显示内容设置

在<Display Mode>设置为<Quad>时，此2个选项可激活配置。<Window Select>选择第几个分栏窗口，<Winodw Display>可以设置该分栏窗口显示的测量数据，可选择的测量数据为：

<X-demod1> ：解调器1的解调结果的X值。

<Y-demod1> ：解调器1的解调结果的Y值。

<R-demod1> ：解调器1的解调结果的R值。

<θ-demod1> ：解调器1的解调结果的θ值。
<X-demod2> ：解调器2的解调结果的X值。
<Y-demod2> ：解调器2的解调结果的Y值。
<R-demod2> ：解调器2的解调结果的R值。
<θ-demod2> ：解调器2的解调结果的θ值。
<X-demod3> ：解调器3的解调结果的X值。
<Y-demod3> ：解调器3的解调结果的Y值。
<R-demod3> ：解调器3的解调结果的R值。
<θ-demod3> ：解调器3的解调结果的θ值。
<X-demod4> ：解调器4的解调结果的X值。
<Y-demod4> ：解调器4的解调结果的Y值。
<R-demod4> ：解调器4的解调结果的R值。
<θ-demod4> ：解调器4的解调结果的θ值。
<X-demod5> ：解调器5的解调结果的X值。
<Y-demod5> ：解调器5的解调结果的Y值。
<R-demod5> ：解调器5的解调结果的R值。
<θ-demod5> ：解调器5的解调结果的θ值。
<X-demod6> ：解调器6的解调结果的X值。
<Y-demod6> ：解调器6的解调结果的Y值。
<R-demod6> ：解调器6的解调结果的R值。
<θ-demod6> ：解调器6的解调结果的θ值。
<X-demod7> ：解调器7的解调结果的X值。
<Y-demod7> ：解调器7的解调结果的Y值。
<R-demod7> ：解调器7的解调结果的R值。
<θ-demod7> ：解调器7的解调结果的θ值。
<X-demod8> ：解调器8的解调结果的X值。
<Y-demod8> ：解调器8的解调结果的Y值。
<R-demod8> ：解调器8的解调结果的R值。
<θ-demod8> ：解调器8的解调结果的θ值。
<XNoise-Demod1>：解调器1的解调结果的X-Noise值。
<YNoise-Demod1>：解调器1的解调结果的Y-Noise值。
<XNoise-Demod5>：解调器5的解调结果的X-Noise值。
<YNoise-Demod5>：解调器5的解调结果的Y-Noise值。

四个分栏显示窗口可以灵活选择要显示的内容，默认是显示解调器 1 的<X>、<Y>、<R>和<θ>值。

5.5.2 上位机配置

[DISPLAY]子菜单仅设置前面板界面的显示结果，不影响上位机的配置信息，上位机的数据测量结果可单独配置显示，如图 46 所以，可选择任意一个解调器的测量结果进行显示，相对于前面板界面，上位机的配置更加灵活方便。

另外上位机还配置有波形图显示模式，如图 47 所示，切换到 Wave 菜单，可以选择其中一个输出结果进行波形观察。

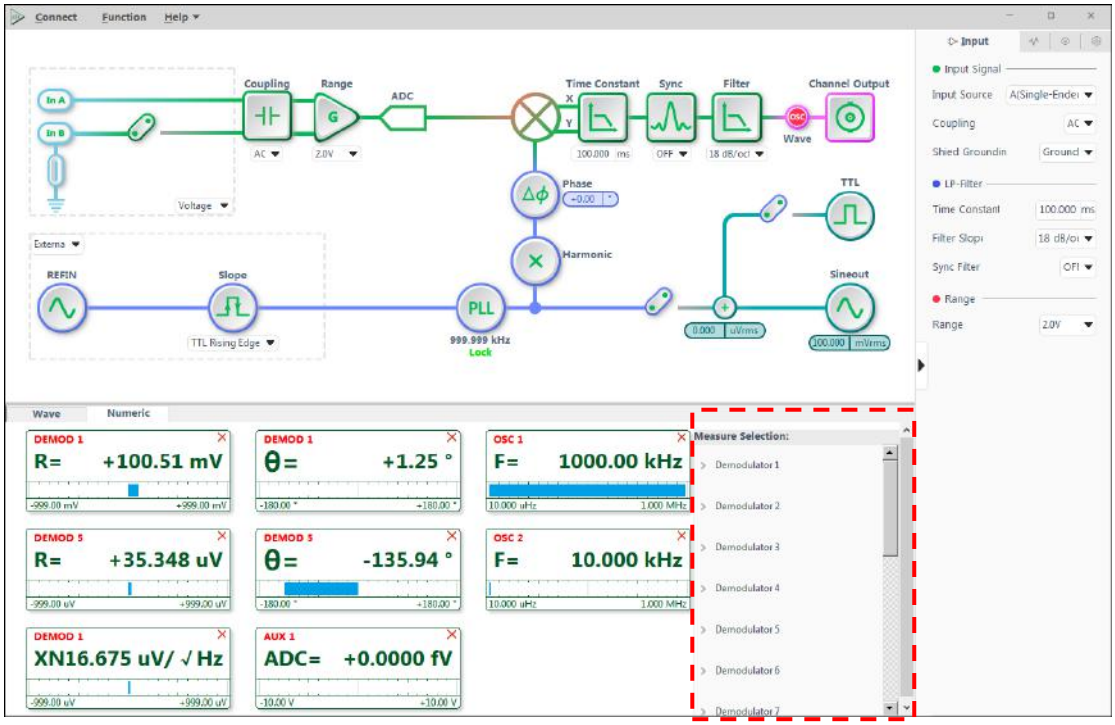


图46. 上位机[DISPLAY]设置 1

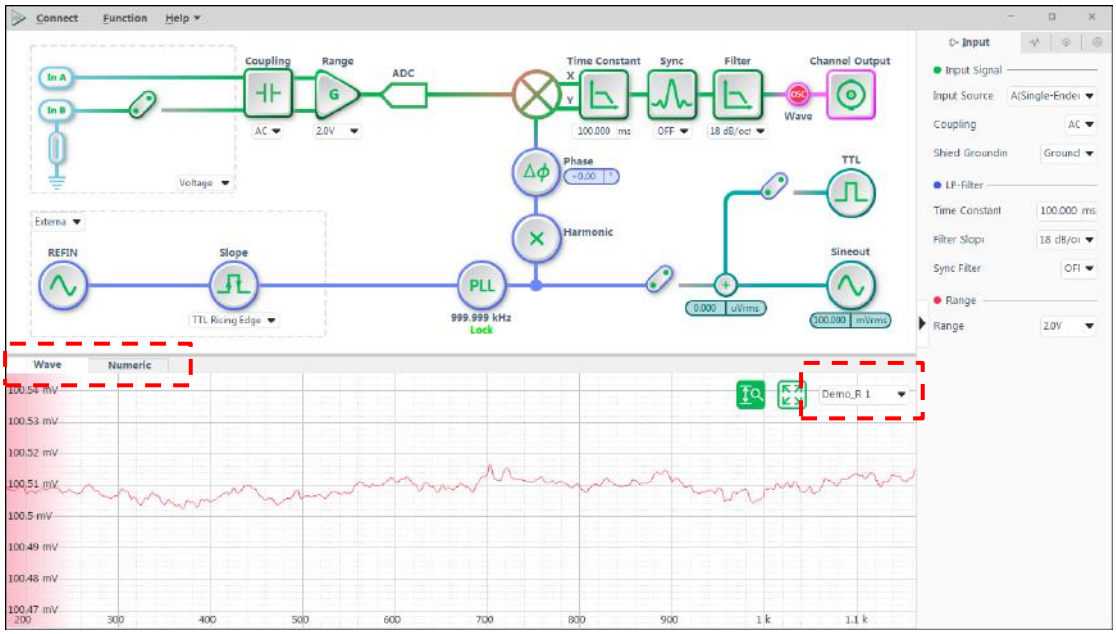


图47. 上位机[DISPLAY]设置 2

5.6 [SIGNAL OUTPUT] 子菜单

5.6.1 前面板界面配置

在前面板的 MENU 菜单栏选择[SIGNAL OUTPUT]子菜单进入，本菜单可对 Sine Out 和 TTL out 接口的参数进行配置，如图 48 右边栏所示：

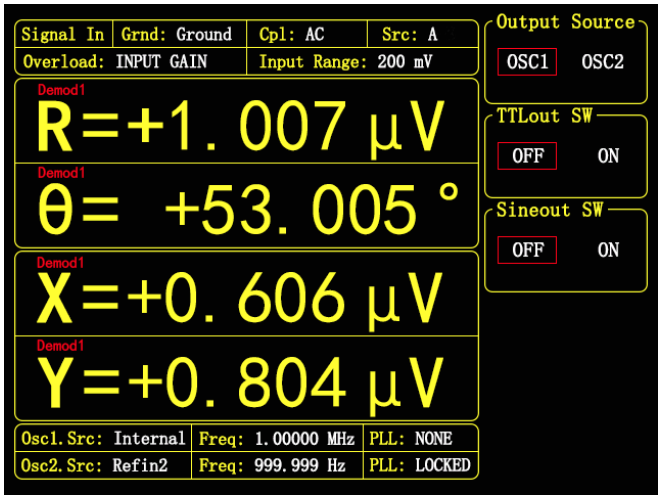


图48. [SIGNAL OUTPUT]子菜单

此子菜单中包括<Output Source>、<TTLout SW>、<Sineout SW>、<Amplitude>和<Offset>五种功能设置。

OE2011/OE2021 可通过前面板的“Sine Out”BNC 接头输出幅值由 100nVrms 到 5 Vrms 的正弦波信号，其基准源跟随内部振荡器，相当于内部振荡器的可调幅值输出。

当<Osc.Mode>使用<External>外部参考时，“Sine Out”输出一个与外部参考同频同相的正弦信号；当使用<Internal>内部参考时，将由仪器自身的振荡器产生信号。

后面板上“TTL OUT”的 BNC 接头将输出与“Sine Out”同频同相的 TTL 信号。

- <Output Source>：SIGNAL OUTPUT 的输出源设置

通过按键可以将 SIGNAL OUTPUT 的基准源在<OSC1>和<OSC2>两个内部振荡器中切换，如切换到<OSC1>，则“Sine Out”和“TTL OUT”的频率基准源都跟随 OSC1。

- <TTLout SW>：TTL out 接口的输出模式设置

<OFF> ：关闭 TTLout 输出，此时 TTLout 恒定输出 0V。

<ON> ：打开 TTLout 输出，此时 TTLout 输出 3.3V TTL 方波信号。

- <Sineout SW>：输出模式设置

<OFF> ：关闭 Sineout 输出，此时 Sineout 恒定输出 0V。

<ON> ：打开 Sineout 输出，此时可根据<Amplitude>和<Offset>设定输出正弦波的幅值和偏置，如图 49 所示。

在一些时候，在极其微弱的信号测量（如电阻热噪声测量）时，建议关闭 Sineout 和 TTLout 的输出，降低对系统内部同频干扰的影响。

- <Amplitude>：Sineout 输出幅值设置

可通过数字键盘和旋钮输入 Sineout 的幅值，范围 0.1 μVrms~5 Vrms 有效值，最小分辨率为 0.1 μVrms。

- <Offset>：Sineout 输出偏置设置

可通过数字键盘和旋钮输入 Sineout 的偏置值，范围-5 V_{DC}~+5 V_{DC} 有效值，最小分辨率为 0.001 V_{DC}。

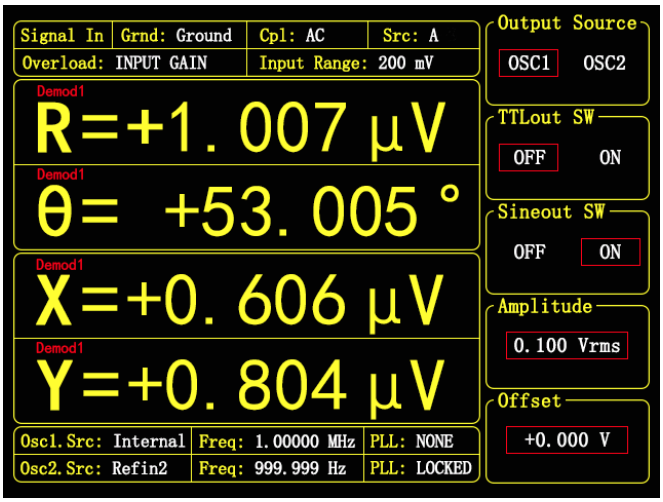


图49. <Sineout SW>打开菜单

5.6.2 上位机配置

如图 50 上位机的红框所示配置区域为[SIGNAL OUTPUT]的配置区域，用户可以在此区域设置解调器参考基准源的相关配置，<Output Source>、<TTLout SW>、<Sineout SW>、<Amplitude>和<Offset>的配置信息均可在红框里修改确认。

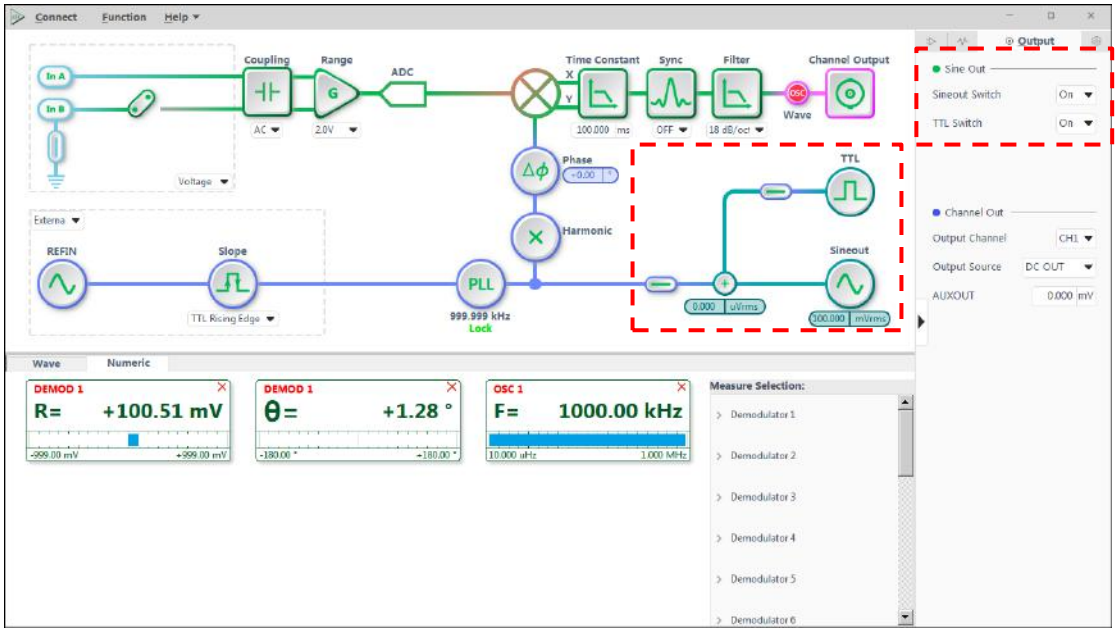


图50. [SIGNAL OUTPUT]的配置区域

5.7 [AUTO SET]子菜单

5.7.1 前面板界面配置

[AUTO SET]子菜单包括 OE2011/OE2021 中的 4 种自动设置。如图 51 右边栏所示：

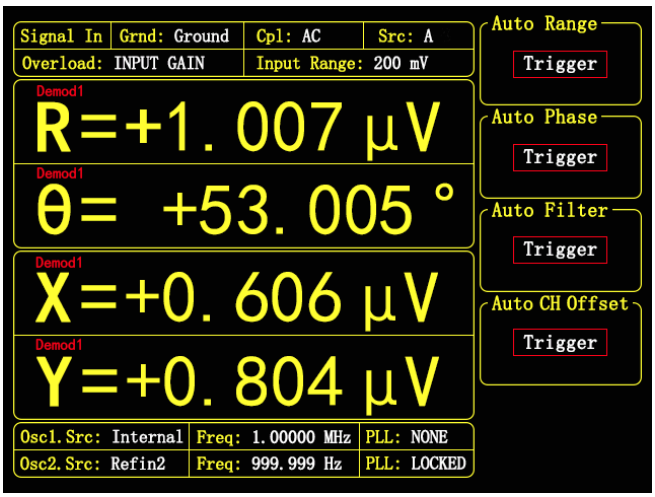


图51. AUTO SET 子菜单

- <Auto Range>：自动设置输入量程功能

当按下<Auto Range>按钮时，仪器会根据当前的信号的幅值而自动改变<Input Range>的设置。其规则是从<2 V>档位开始，一级一级地降低档位，直到最接近信号的实际幅值而又不会导致溢出，就会自动停止，保持当前的量程。

- <Auto Phase>：自动设置移相功能

当按下<Auto Phase>按钮时，仪器会自动调整所有解调器的<Ref.Phase>，使得测得的输入信号相位为 0°。该功能需要一定的响应时间（一般小于 5 秒），如果当前的 θ 值波动较大时，<Auto Phase>设置有可能不成功。此时请切换至[DEMOD REF]子菜单手动设置<Ref.Phase>值。

- <Auto Filter>：自动设置解调器的滤波器功能

当按下<Auto Filter>按钮时，仪器会根据每个解调器的参考频率，自动计算所有解调器的<Time Constant>和<Filter dB/oct>，其规则是：

Time Constant = 10 / Frequency, Filter = 24 dB/oct

- <Auto CH Offset>：自动设置 CHout 接口的输出偏置功能

当按下<Auto CH Offset>按钮时，仪器会自动修改[CHANNEL OUTPUT]的<Offset>值，使当前 2 个 CHOUT 通道的公式计算结果为 0。

5.7.2 上位机配置

空。

5.8 [CHANNEL OUTPUT]子菜单

5.8.1 前面板界面配置

在前面板的 MENU 菜单栏选择[CHANNEL OUTPUT]子菜单进入，如图 52 右边栏所示：

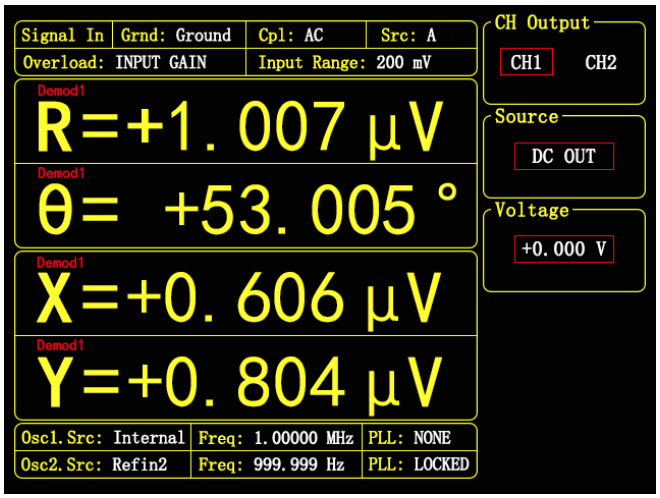


图52. [CHANNEL OUTPUT]子菜单

[CHANNEL OUTPUT]子菜单控制后面板上 CHOUT 的 2 个 BNC 通道，可以输出用户需要的任意值、R、X、Y 和 θ 值等，以及通过<Sensitivity>设置衰减系数，<Offset&Expand>设置输出的偏置与放大倍数。

输出信号的计算公式如下

1、 当选择信号为 Demod1~Demod8 的<R>、<X>、<Y>时:

$$\text{输出} = \left(\frac{\text{Signal(选择信号)}}{\text{Sens}} + \text{Offset}\right) \times \text{Expand} \times 10\text{V}$$

2、 当选择信号为 Demod1~Demod8 的<Theta>时:

$$\text{输出} = \left(\frac{\text{Theta}}{180^\circ} + \text{Offset}\right) \times \text{Expand} \times 10\text{V}$$

3、 除了上面两种情况，还有下面选项：

a) DC OUT：按照用户设定的电压值输出，范围是-10V~10V，分辨率为 1 mV。

b) AUXIN1~AUXIN4：输出等于 AUXIN 接口的输入电压。

- <CH Output>：CH 通道选择设置

分别选择 CH1 到 CH2 的通道配置，每个通道可以单独选择一个输出源。

- <Source>：通道的输出源设置

<DC OUT> ：通道输出设定的电平。每个 CH 通道都有独立的<DC OUT>参数。
<X-Demod1> ：通道输出解调器 1 的 X 值对应的模拟电平。
<Y-Demod1> ：通道输出解调器 1 的 Y 值对应的模拟电平。
<R-Demod1> ：通道输出解调器 1 的 R 值对应的模拟电平。
<θ-Demod1> ：通道输出解调器 1 的 θ 值对应的模拟电平。
<X-Demod2> ：通道输出解调器 2 的 X 值对应的模拟电平。
<Y-Demod2> ：通道输出解调器 2 的 Y 值对应的模拟电平。

<R-Demod2> ：通道输出解调器 2 的 R 值对应的模拟电平。
<θ-Demod2> ：通道输出解调器 2 的 θ 值对应的模拟电平。
<X-Demod3> ：通道输出解调器 3 的 X 值对应的模拟电平。
<Y-Demod3> ：通道输出解调器 3 的 Y 值对应的模拟电平。
<R-Demod3> ：通道输出解调器 3 的 R 值对应的模拟电平。
<θ-Demod3> ：通道输出解调器 3 的 θ 值对应的模拟电平。
<X-Demod4> ：通道输出解调器 4 的 X 值对应的模拟电平。
<Y-Demod4> ：通道输出解调器 4 的 Y 值对应的模拟电平。
<R-Demod4> ：通道输出解调器 4 的 R 值对应的模拟电平。
<θ-Demod4> ：通道输出解调器 4 的 θ 值对应的模拟电平。
<X-Demod5> ：通道输出解调器 5 的 X 值对应的模拟电平。
<Y-Demod5> ：通道输出解调器 5 的 Y 值对应的模拟电平。
<R-Demod5> ：通道输出解调器 5 的 R 值对应的模拟电平。
<θ-Demod5> ：通道输出解调器 5 的 θ 值对应的模拟电平。
<X-Demod6> ：通道输出解调器 6 的 X 值对应的模拟电平。
<Y-Demod6> ：通道输出解调器 6 的 Y 值对应的模拟电平。
<R-Demod6> ：通道输出解调器 6 的 R 值对应的模拟电平。
<θ-Demod6> ：通道输出解调器 6 的 θ 值对应的模拟电平。
<X-Demod7> ：通道输出解调器 7 的 X 值对应的模拟电平。
<Y-Demod7> ：通道输出解调器 7 的 Y 值对应的模拟电平。
<R-Demod7> ：通道输出解调器 7 的 R 值对应的模拟电平。
<θ-Demod7> ：通道输出解调器 7 的 θ 值对应的模拟电平。
<X-Demod8> ：通道输出解调器 8 的 X 值对应的模拟电平。
<Y-Demod8> ：通道输出解调器 8 的 Y 值对应的模拟电平。
<R-Demod8> ：通道输出解调器 8 的 R 值对应的模拟电平。
<θ-Demod8> ：通道输出解调器 8 的 θ 值对应的模拟电平。
<AUXIN1> ：通道输出 AUX-IN1 接口对应的电平。
<AUXIN2> ：通道输出 AUX-IN2 接口对应的电平。
<AUXIN3> ：通道输出 AUX-IN3 接口对应的电平。
<AUXIN4> ：通道输出 AUX-IN4 接口对应的电平。

- <Voltage>：固定 DC 输出模式的输出电压值

在<Source>设置为<DC OUT>时，可设置<Voltage>，如图 52 所示。可通过数字键盘输入电压值，设置范围是-10V~10V，分辨率为 1 mV。

- <Sensitivity>：灵敏度设置

当<Source>选择除<DC OUT>和<AUXIN1~4>以外的其它源时，会出现<Sensitivity>、<Offset>和<Expand>的选项菜单界面如图 53 所示。

其中<Sensitivity>灵敏度可选择的范围如表 3 所示，注意，当<Source>设置为 Demod1 至 Demod8 的<Theta>时，<Sensitivity>设置无效。

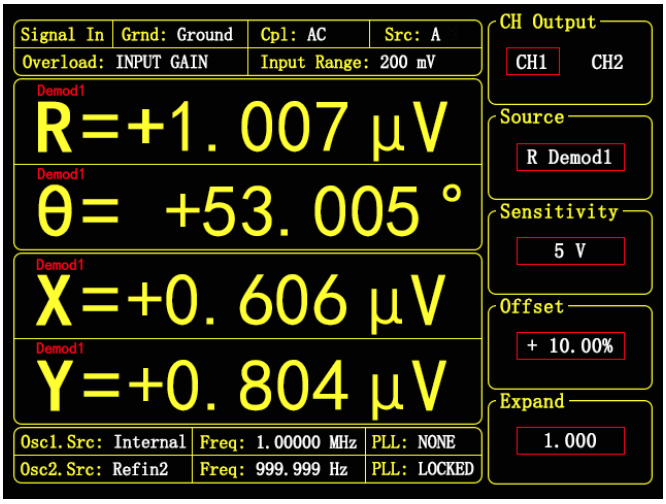


图53. <Offset&Expand>界面

表3. 灵敏度可设置表

1 nV/pA	500 nV/pA	200 μV/nA	100 mV/μA
2 nV/pA	1 μV/nA	500 μV/nA	200 mV/μA
5 nV/pA	2 μV/nA	1 mV/μA	500 mV/μA
10 nV/pA	5 μV/nA	2 mV/μA	1 V/mA
20 nV/pA	10 μV/nA	5 mV/μA	2 V/mA
50 nV/pA	20 μV/nA	10 mV/μA	5 V/mA
100 nV/pA	50 μV/nA	20 mV/μA	-
200 nV/pA	100 μV/nA	50 mV/μA	-

- <Offset>：偏置设置：

  通过数字键盘输入，可调范围是-100%~ +100%，其中最小步进为 0.01%，默认 0.00%。

- <Expand>：放大倍数设置

通过数字键盘输入，可调范围是 0.001~10000，默认值为 1。但 Expand 的设置使得计算超出了±10V 的时候，输出值将会维持在±10V。

☆注：每一个 CH 通道有一个独立的偏置值和放大值。假如设置了 CH1 的<Offset>是 50%和<Expand>是 3，那只有 CH1 通道输出会受影响，CH2 的输出不变。

☆注：<Sensitivity>、<Offset>与<Expand>的设置不会影响动态区域数据框内的数据显示。

5.8.2 上位机配置

如图 54 上位机的红框所示配置区域为[CHANNEL OUTPUT]的配置区域，用户可以在此区域设置解调器参考基准源的相关配置，<CH Output>、<Source>、<Voltage>、<Sensitivety>、<Expand>和<Offset>的配置信息均可在红框里修改确认。

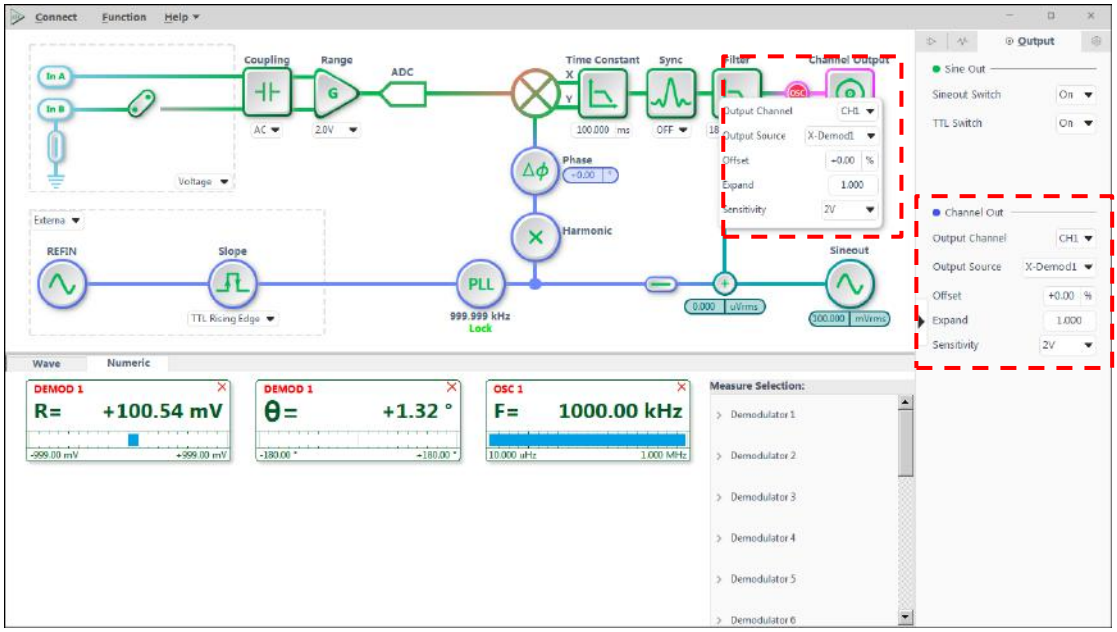


图54. [CHANNEL OUTPUT]的配置区域

5.9 [SYSTEM]子菜单

5.9.1 前面板界面配置

[SYSTEM]子菜单包括 OE2011/OE2021 中的系统资信息与系统设置。如仪器信息，屏幕亮度，通讯设置等。如图 55 右边栏所示：

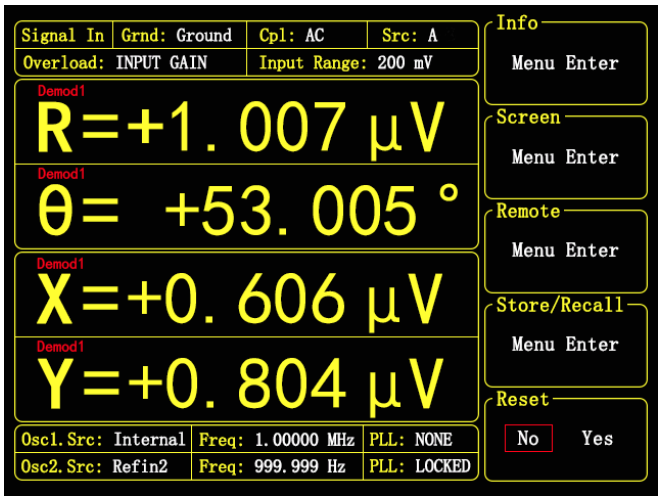


图55. [SYSTEM]子菜单

- <Info>二级子菜单

选择<Info>二级子菜单进入，界面显示研发单位信息，售后联系方式，产品序列号，版本号等信息，如图 56 所示。其中序列号应与后面板的出厂标签上一致。

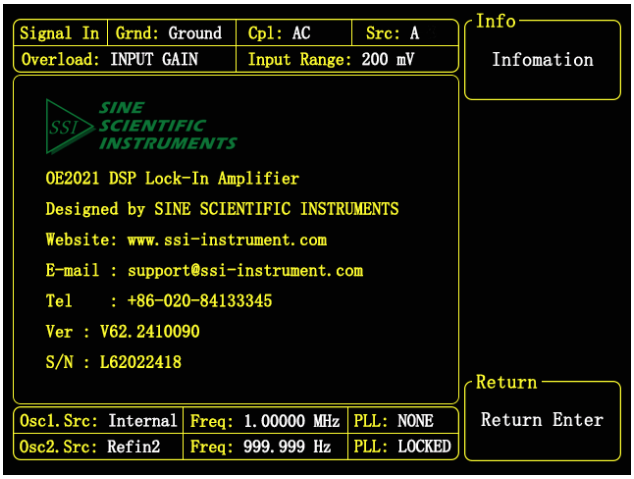


图56. <INFO>-仪器信息

- <Screen>二级子菜单

选择<Screen>子菜单进入，此子菜单中包括<Window Color>和<Backlight>两种功能设置：如图 57 所示：

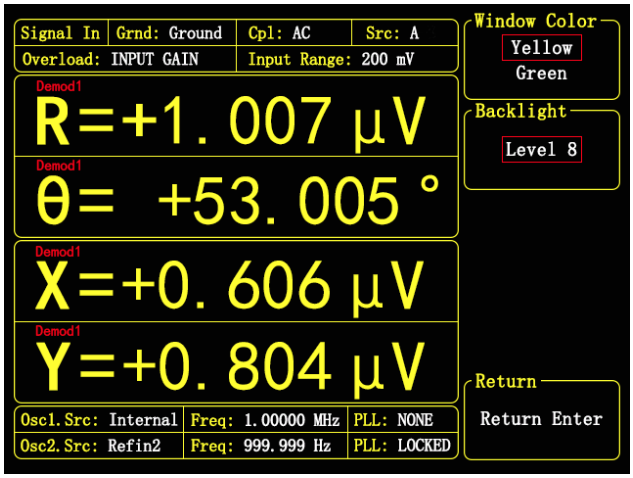


图57. <Screen>子菜单-<Yellow>风格

图58. <Screen>子菜单-<Green>风格

<Window Color>：界面色调设置

<Yellow> ：界面主色调为黄色风格，如图 57 所示。
<Green> ：界面主色调为绿色风格，如图 58 所示。

<Backlight>：背光亮度设置

通过旋钮调节，亮度等级可从<Level1>调节至<Level8>，对应亮度从低到高，默认为<Level8>。

- <Remote>二级子菜单

选择<Remote>二级子菜单进入，如图 59 所示。

OE2011/OE2021 有三种远程通讯接口，RS232 串口、USB2.0 高速接口、Ethernet 以太网接口，根据<Remote Mode>选中的接口来设置对应的配置。

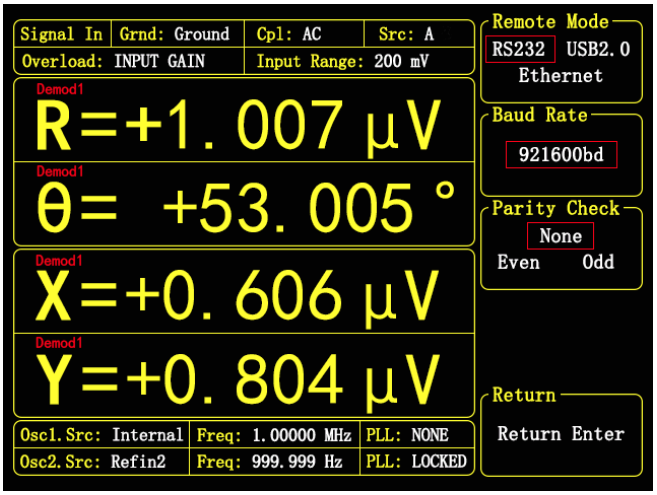


图59. <Remote>子菜单-<RS232>选项

- <Remote Mode>：远程接口选择

<RS232> ：RS232 串行通讯接口，为 DB9 母接口。配置界面如图 59 所示。
<USB2.0> ：USB2.0 高速通讯接口。配置界面如图 60 所示。
<Ethernet> ：1000Mbps 以太网接口。其中端口号为 10001，假设 OE2011/OE2021 获取到的网络 IP 地址为 192.168.1.10，则电脑端连接 OE2011/OE2021 的 IP 地址为 192.168.1.10:10001。配置界面图 61 如所示。

出厂配套上位机远程控制软件是以 USB2.0 和 Ethernet 接口为基础的。

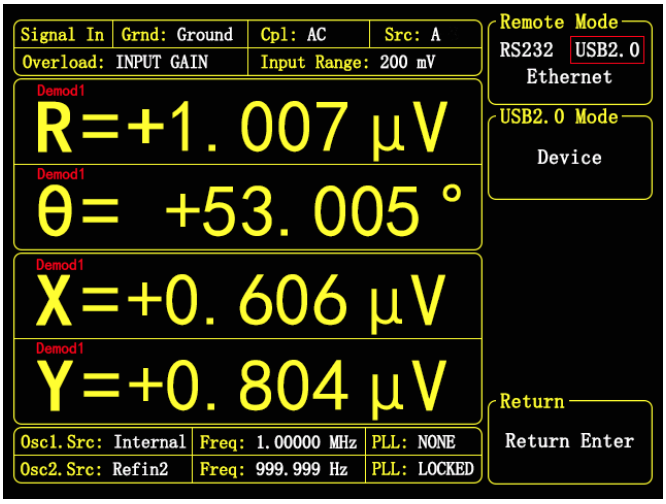


图60. <Remote>子菜单-<USB2.0>选项

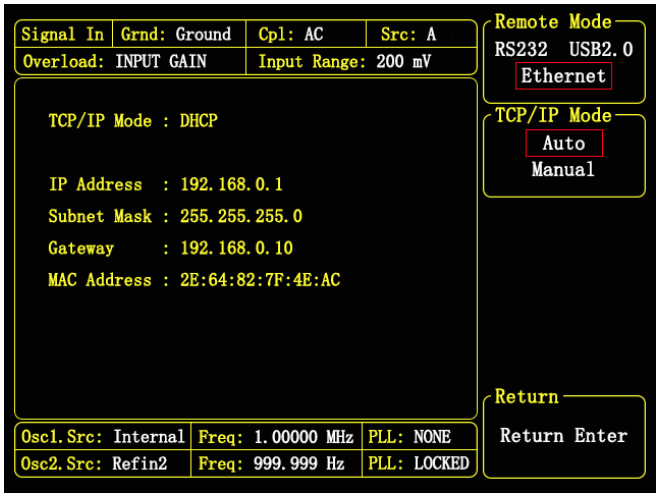


图61. <Remote>子菜单-<Ethernet>选项

- <Baud Rate>：波特率设置

在<RS232>模式下此选项可见。通过重复按对应软键或旋钮调节波特率，数值可设置为：<600>、<1200>、<2400>、<4800>、<9600>、<19200>、<38000>、<43000>、<56000>、<57600>、<115200>、<230400>、<460800>、<921600>。默认为<921600>。

- <Parity Check>：奇偶校验设置

在<RS232>模式下此选项可见。

<Even> ：偶校验

<ODD> ：奇校验

<NONE> ：无校验

- <TCP/IP Mode>：以太网 TCP/IP 模式设置

在<Ethernet>模式下此选项可见。一般情况下，接上网线后，用<Auto>模式就可以自动连接上局域网。

<Auto> ：自动配置 TCP/IP 协议。

<Manual>：手动配置 TCP/IP 协议。

在<Auto>模式时，当检测到网络接入后，会跳转到图 62 的状态“Connecting...”，表示正在连接当前网络。当连接网络成功时，如图 63 所示，会显示当前所在网络的本机 IP 地址、

子网掩码、网关和本机 mac 地址。

在<Manual>模式时，可手动配置 TCP/IP 协议的 IP 地址、子网掩码和网关，如图 64 所示。在<IP Select>窗口中选中要修改的 IP、subnet、Gateway，再按下<Excute>按键，即可在数字键盘区域输入要配置的参数，如图 65 所示，最后按<ENTER>确认。

当配置完成后，即可在局域网内对 OE2021 进行配置和读取数据。

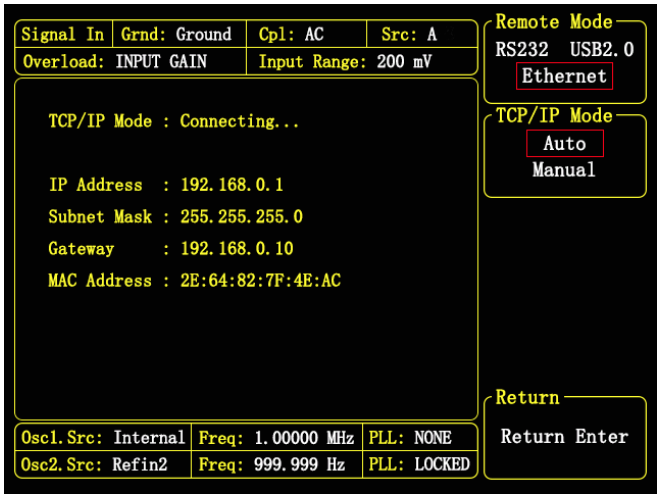


图62. <Auto>模式——Connecting

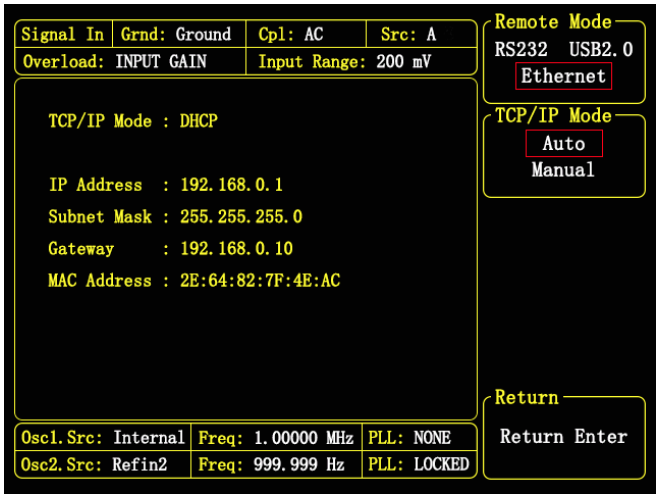


图63. <Auto>模式——连接成功

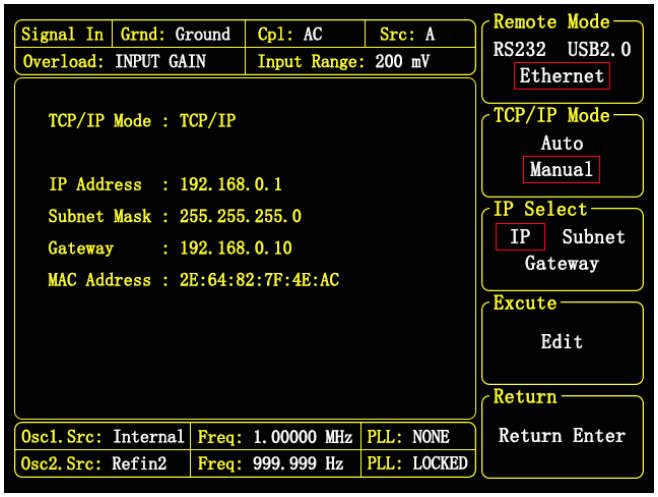


图64. <Manual>模式

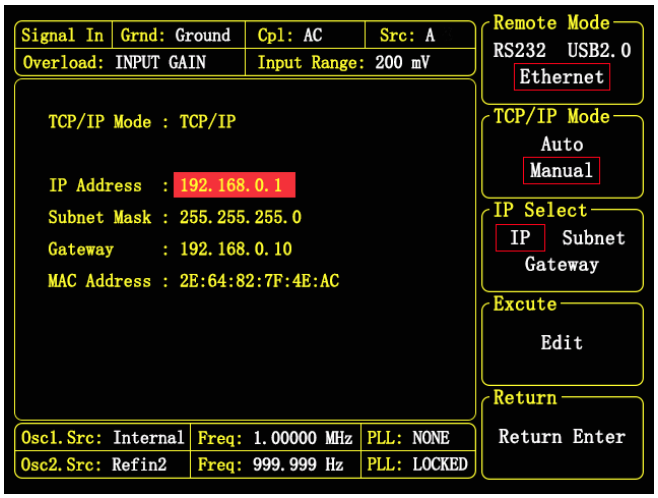


图65. <Manual>模式修改中

- <Store/Recall>：保存/读取配置

<Store/Recall> 菜单主要用来保存（Store）和读取（Recall）已经设定的参数和状态。根据用户个人的喜好，可以在项中保存为 <S1>， <S2>， <S3> 和 <S4> 四个存档。如图 66 所示，选择< Store >，<Channel>选择<S1>，再选择 <Execute >项中的 < Store >，即可将当前设定的参数和状态保存在 <S1> 存档。需要读取该存档，只需选择 <Recall>，然后在 <Channel> 选择<S1>，再选择 <Execute> 项中的 <Call> 即可。

另外在 <Recall> 状态时，<Channel>还有<Default>选项，可以把整机配置还原成默认值。

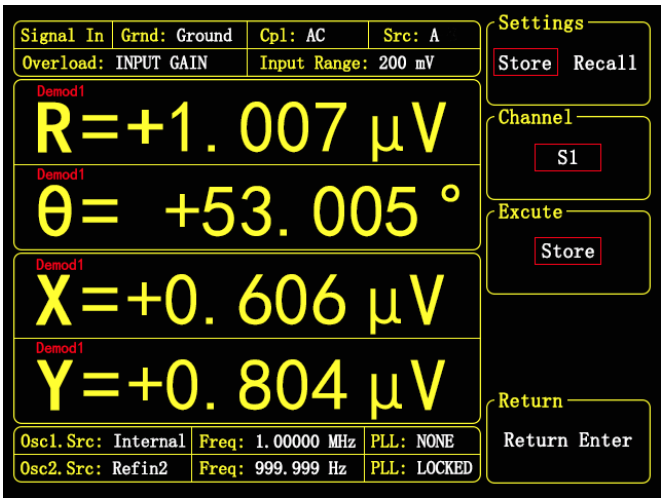


图66. <Store/Recall>菜单

- <Reset>：锁相放大器软复位

  按下对应软键会软重启系统。重启后不改变当前设置。

5.10 [AUX OUTPUT] 子菜单

5.10.1 前面板界面配置

在前面板的 MENU 菜单栏选择[AUX OUTPUT]子菜单进入，如图 67 右边栏所示：

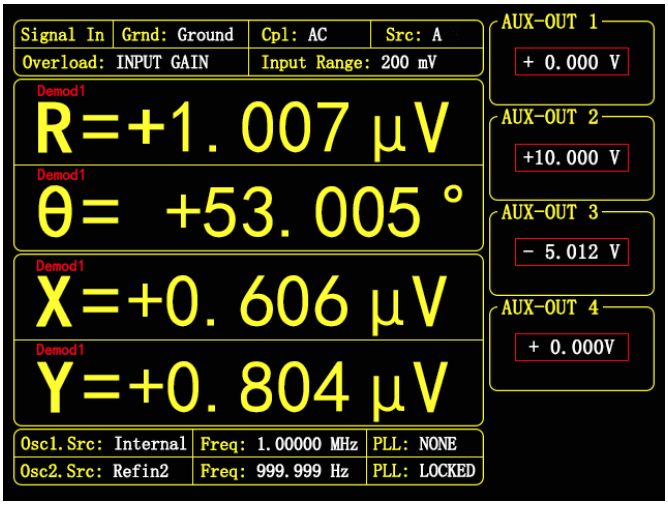


图67. [AUX OUTPUT]子菜单

- <AUX-OUT 1>：设置 AUX-OUT 1 接口的输出电压值
- <AUX-OUT 2>：设置 AUX-OUT 2 接口的输出电压值
- <AUX-OUT 3>：设置 AUX-OUT 3 接口的输出电压值

- <AUX-OUT 4>：设置 AUX-OUT 4 接口的输出电压值

<AUX-OUT1>至<AUX-OUT4>可可通过数字键盘输入电压值，设置范围是-10V~10V，分辨率为 1 mV。

5.10.2 上位机配置

空。

5.11 上位机数据保存

上位机软件有数据记录保存的功能，可根据用户需要选择是否保存一段时间内的 OE2011/OE2021 采集到的数据。

保存的数据包括测量信号的 R、X、Y、θ 和噪声的值；测量的 8 路解调器的 R、X、Y 和 θ 的值；2 个振荡器的测量频率以及四路辅助输入的信号值。

选择是否存储数据的具体步骤如下：

1. 当软件运行时，点击图 68 红框内“Save Data”按钮，当按钮被按下并显示“Saving...”，表示正在保存当前采集的数据。
2. 数据以 Excel 表格的形式保存，文件名为“SSI_Data_Record.csv”，保存在程序目录下。
3. 再次按下“Saving...”按钮，按钮状态由“Saving...”重新变为“Save Data”，表示停止保存采集的数据。
4. 在“ Sample Rate(S): 1.000 ”可以修改当前显示和保存数据的采样率，输入范围为 0.001s~100s。

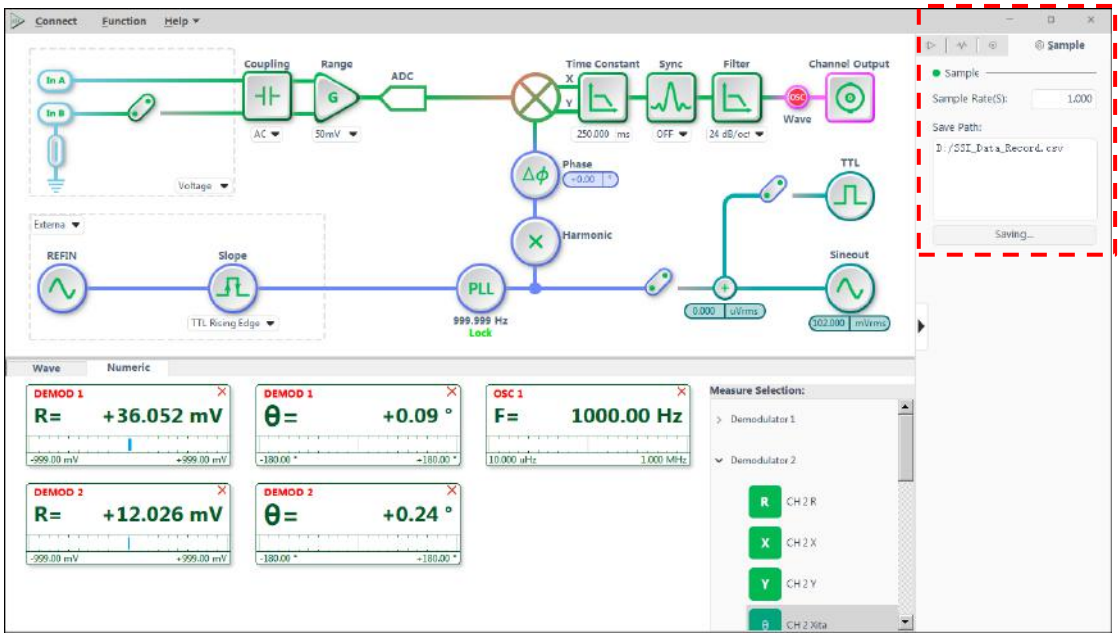


图68. 数据保存配置区域图

6. 远程编程

6.1 OE2011/OE2021 命令语法

上位机与 OE2011/OE2021 的通信使用 ASCII 字符来进行。命令符使用大写，所有命令均由四个命令字符（如有必要可带上参数）和一个命令终结符组成。当使用 RS232、USB2.0、Ethernet 接口通信时，终结字符必须是一个分号<;>、一个回车符<cr>。OE2011/OE2021 只有在收到命令终结符时，才会执行用户输入的命令。命令可能需要一个或多个参数，多个参数之间用逗号分隔(,)。

多个命令可以在同一命令行发送，但命令之间需要添加分号(;)。在同一行发送多个命令和分别发送几个独立命令的区别在于：当一个命令行被解析和执行时，在整个命令行执行完成之前，OE2011/OE2021 无法执行其他命令。

OE2011/OE2021 拥有一个容量为 1024 个字符的输入缓存区，并根据接收命令的顺序来处理命令。当缓存区写满时，最新命令将会把最旧并已执行命令覆盖。建议输入多个命令时不要超过 1024 个字符。

OE2011/OE2021 允许用户通过命令查询内部参数的当前值。查询命令的格式为由当前命令后加上一个问号“?”并省略原命令所需的一个或多个参数。OE2011/OE2021 以 ASCII 字符串的形式返回用户所查询的参数，如果一个命令行中发送多个查询(用分号隔开)的话，应答将会按顺序一个一个地返回，每个返回值后尾都跟着一个终结符。

命令格式举例：

FMOD 0,1 <cr>	设置内部振荡器 OSC1 的参考源为内部模式
FREQ 0,10E3 <cr>	设置内部振荡器 OSC1 的参考信号频率为 10 kHz
OUTP? 1 <cr>	查询解调器 1 的 Y 的输出值

6.2 详细的命令列表

每一个命令所指定的参数是有严格顺序的，不同参数之间用逗号(,)分隔。在大括号{}里面的参数是可选的，不需要每个都填写。只有在命令后面加上(?)的助记符时，才会启动查询命令，没有(?)是不会查询的。大部分情况下，查询命令不需要发送大括号{}内的内容。注意：在发送命令时()和{}都不需要发送。

变量定义如下：

i,j,k,l,m,n,o,p,q,r,s,t,u	整数
x	实数
f	频率值

以上所有的数值变量均可以被表示为整数、浮点数或指数格式（例如，数字 5 可以表示为 5 , 5.0 , 0.5E1）。而字符串则被作为一个 ASCII 字符序列的形式发送。

6.2.1 输入通道配置指令

<table>
<tr><td>ISRC (?) {i}</td><td>ISRC 指令用于设置或查询输入信号的方式。
参数 i=0 时选择<A>(单端电压信号输入)；
i=1 时选择<A-B>(差分电压输入)；
i=2 时选择<I>(电流输入)。</td></tr>
<tr><td>IGND (?) {i}</td><td>IGND 指令用于设置或查询输入接口屏蔽层的接地方式。
参数 i=0 时选择<Float>模式（输入接头外壳与仪器地通过 10 kΩ 电阻隔离）；i=1 时选择<Ground>模式（输入接头外壳与仪器地通过 10 Ω 电阻短接）。</td></tr>
<tr><td>ICPL (?) {i}</td><td>ICPL 指令用于设置或查询输入耦合方式。
参数 i=0 时选择<AC>(交流耦合输入)；i=1 时选择<DC>(交流耦合输入)。</td></tr>
<tr><td>IRNG(?) {i}</td><td>IRNG 指令用于设置或查询输入通道的量程。参数 i 用于选择不同量程。
具体如下：
<table>
<tr><td>i</td><td>Input Range</td></tr>
<tr><td>0</td><td>5 V / 5mA</td></tr>
<tr><td>1</td><td>1 V / 500µA</td></tr>
<tr><td>2</td><td>200 mV / 50µA</td></tr>
<tr><td>3</td><td>50 mV / 5µA</td></tr>
<tr><td>4</td><td>10 mV / 500nA</td></tr>
<tr><td>5</td><td>2 mV / 50nA</td></tr>
<tr><td>6</td><td>1 mV / 500pA</td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td>RMOD?</td><td>RMOD 指令用于查询系统的动态储备，返回参数为整型数据，代表含义：
<table>
<tr><td>返回参数</td><td>动态储备</td></tr>
<tr><td>0</td><td>High</td></tr>
<tr><td>1</td><td>Normal</td></tr>
<tr><td>2</td><td>Low</td></tr>
</table></td></tr>
</table>

6.2.2 振荡器配置指令

OE2011/OE2021 拥有 2 个振荡器 OSC1 和 OSC2，所有振荡器相关指令都需要增加振荡器通道的选择参数。振荡器通道的参量用 i 表示，i=0 时选择振荡器 OSC1，i=1 时选择振荡器 OSC2。

FMOD (?) i {,j}	FMOD 指令用于设置或查询振荡器的内外部模式。 发送该指令时参数 i 必须设置，参数 i 表示振荡器的通道数，i=0 时选择振荡器 OSC1，i=1 时选择振荡器 OSC2。 参数 j=0 时选择外部参考模式，j=1 时选择内部参考模式。
RSRC (?) i {,j}	RSRC 指令用于设置或查询振荡器外部参考模式的参考信号源。 发送该指令时参数 i 必须设置，参数 i 表示振荡器的通道数，i=0 时选择振荡器 OSC1，i=1 时选择振荡器 OSC2。 参数 j=0 时选择 Ref In 接口； j=1 时选择 Signal In 接口； j=2 时选择 Aux In 1 接口； j=3 时选择 Aux In 2 接口； j=4 时选择 Aux In 3 接口； j=5 时选择 Aux In 4 接口； j=6 时选择 Trig In 接口。
FREQ (?) i {,f}	FREQ 指令用于设置或查询振荡器内部参考模式的信号频率。 发送该指令时参数 i 必须设置，参数 i 表示振荡器的通道数，i=0 时选择振荡器 OSC1，i=1 时选择振荡器 OSC2。 参数 f 值可设置范围 $10E^{-5}$～$1.5E^{6}$，最小分辨率为 $1E^{-9}$。 指令 FREQ?会返回当前的参考信号频率，当振荡器处于内部模式时，返回内部参考模式的信号频率；当振荡器处于外部模式时，返回外部参考源的频率。
FEXT ? i	FEXT 指令用于查询振荡器外部模式的参考源的频率。 发送该指令时参数 i 必须设置，参数 i 表示振荡器的通道数，i=0 时选择振荡器 OSC1，i=1 时选择振荡器 OSC2。 返回参数类型为浮点数，参数范围在 $10E^{-5}$～$1.5E^{6}$。

FINT ? i	FEXT 指令用于查询振荡器内部模式的参考信号频率。 发送该指令时参数 i 必须设置，参数 i 表示振荡器的通道数，i=0 时选择振荡器 OSC1，i=1 时选择振荡器 OSC2。 返回参数类型为浮点数，参数范围 $10E^{-5}$～$1.5E^{6}$。
RSLP (?) i {,j}	RSLP 指令用于设置或查询 Ref In 接口的触发方式。 发送该指令时参数 i 必须设置，参数 i 表示振荡器的通道数，i=0 时选择振荡器 OSC1，i=1 时选择振荡器 OSC2。 参数 j=0 时设置 TTL 电平上升沿触发； j=1 时设置 TTL 电平下降沿触发； j=2 时设置正弦波过零点检测； 当频率低于 1 Hz 时，必须使用 TTL 的两种触发方式。

6.2.3 解调器配置指令

OE2011/OE2021 拥有 8 个解调器 Demod1~Demod8，所有解调器的相关指令都需要增加解调器通道的选择参数。下述指令的解调器通道的参量用 i 表示，i=0 时选择解调器 Demod1，i=1 时选择解调器 Demod2，i=2 时选择解调器 Demod3…… i=7 时选择解调器 8。

DSRC (?) i {,j}	DSRC 指令用于设置或查询解调器的输入信号源。 发送该指令时参数 i 必须设置，参数 i=0 时选择解调器 Demod1，i=1 时选择解调器 Demod2，i=2 时选择解调器 Demod3…… i=7 时选择解调器 8。 参数 j=0 时选择 Signal In 接口； j=1 时选择 Aux In 1 接口； j=2 时选择 Aux In 2 接口； j=3 时选择 Aux In 3 接口； j=4 时选择 Aux In 4 接口； j=5 时选择解调器 Demod1 的 X 数据； j=6 时选择解调器 Demod1 的 Y 数据； j=7 时选择解调器 Demod1 的 R 数据； j=8 时选择解调器 Demod1 的 θ 数据； j=9 时选择解调器 Demod5 的 X 数据； j=10 时选择解调器 Demod5 的 Y 数据； j=11 时选择解调器 Demod5 的 R 数据； j=12 时选择解调器 Demod5 的 θ 数据。 注意，解调器通道 1 不能修改输入信号源，无论如何配置，解调器 Demod1 的输入源都保持 Signal In 接口。
OFLT (?) i {,x}	OFLT 指令用于设置或查询解调器的滤波器的时间常数。 发送该指令时参数 i 必须设置，参数 i=0 时选择解调器 Demod1，i=1 时选择解调器 Demod2，i=2 时选择解调器 Demod3…… i=7 时选择解调器 8。 参数 x 值可设置范围 $1E^{-7}$~3000，最小分辨率为 $1E^{-7}$。
OFSL (?) i {,j}	OFSL 指令用于设置或查询解调器的低通滤波器的陡降。 发送该指令时参数 i 必须设置，参数 i=0 时选择解调器 Demod1，i=1 时选择解调器 Demod2，i=2 时选择解调器 Demod3…… i=7 时选择解调器 8。 参数 j 用于选择不同陡降。 具体如下：

<table>
<tr><td></td><td>
<table>
<tr><td>j</td><td>Filter dB/oct</td></tr>
<tr><td>0</td><td>6 dB/oct</td></tr>
<tr><td>1</td><td>12 dB/oct</td></tr>
<tr><td>2</td><td>18 dB/oct</td></tr>
<tr><td>3</td><td>24 dB/oct</td></tr>
<tr><td>4</td><td>30 dB/oct</td></tr>
<tr><td>5</td><td>36 dB/oct</td></tr>
<tr><td>6</td><td>42 dB/oct</td></tr>
<tr><td>7</td><td>48 dB/oct</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>SYNC (?) i {,j}</td><td>SYNC 指令用于设置或查询解调器的同步滤波器的开关状态。当参考频率低于 10000 Hz 时可以开启同步滤波器。
发送该指令时参数 i 必须设置，参数 i=0 时选择解调器 Demod1，i=1 时选择解调器 Demod2，i=2 时选择解调器 Demod3…… i=7 时选择解调器 8。
参数 j=0 时关闭同步滤波器；
j=1 时开启同步滤波器。</td></tr>
<tr><td>DMOD (?) i {,j}</td><td>DMOD 指令用于设置或查询解调器的参考源模式。
发送该指令时参数 i 必须设置，参数 i=0 时选择解调器 Demod1，i=1 时选择解调器 Demod2，i=2 时选择解调器 Demod3…… i=7 时选择解调器 8。
参数 j=0 时选择参考模式为振荡器 OSC1；
j=1 时选择参考模式为振荡器 OSC2；
j=2 时选择参考模式为任意频率解调模式，
j=3 时选择参考模式为公式组合频率解调模式。</td></tr>
<tr><td>DARB (?) i {, f}</td><td>DARB 指令用于设置或查询解调器的任意频率模式时的参考频率。
发送该指令时参数 i 必须设置，参数 i=0 时选择解调器 Demod1，i=1 时选择解调器 Demod2，i=2 时选择解调器 Demod3…… i=7 时选择解调器 8。
参数 f 值可设置范围 $10E^{-5}$～$1.5E^{6}$，最小分辨率为 $1E^{-9}$。</td></tr>
<tr><td>DEQU (?) i {,j,k,l,m}</td><td>DEQU 指令用于设置或查询解调器的公式组合频率解调模式时的公式参数。
发送该指令时参数 i 必须设置，参数 i=0 时选择解调器 Demod1，i=1 时选择解调器 Demod2，i=2 时选择解调器 Demod3…… i=7 时选择解调器 8。
参数 j,k,l,m 对应公式 $E=A*F_{OSC}+B*F$ 的 A,F_{OSC},B,F 四个参数；
j 和 l 可以设置范围-10000～10000 之间的浮点数；
k=0 时选择振荡器 OSC1 的频率值，k=1 时选择</td></tr>
</table>

	振荡器 OSC2 的频率值； m=0 时选择振荡器 OSC1 的频率值，k=1 时选择振荡器 OSC2 的频率值，k=2 时选择设定任意频率。
DEAF (?) i {, f}	DEAF 指令用于设置或查询解调器的公式组合频率解调模式时的公式参数中的任意设定频率。 发送该指令时参数 i 必须设置，参数 i=0 时选择解调器 Demod1，i=1 时选择解调器 Demod2，i=2 时选择解调器 Demod3…… i=7 时选择解调器 8。 参数 f 值可设置范围 $10E^{-5}$~$1.5E^{6}$，最小分辨率为 $1E^{-9}$。
HARM (?) i {, j}	HARM 指令用于设置或查询解调器参考信号的谐波阶数。 发送该指令时参数 i 必须设置，参数 i=0 时选择解调器 Demod1，i=1 时选择解调器 Demod2，i=2 时选择解调器 Demod3…… i=7 时选择解调器 8。 参数 j 可以设置为 1 到 10000 之间的整数，表示谐波阶数。HARM i，j 指令将会设置 OE2021 的第 i 个解调器检测参考频率的 j 次谐波的信号。参数 j 必须满足 j*f ≤ 1.5 MHz。如果 j 次谐波的值大于 1.5 MHz，那么解调器的输出结果将会出错。
PHAS (?) i ,{x}	PHAS 指令用于设置或查询参考相移。 发送该指令时参数 i 必须设置，参数 i=0 时选择解调器 Demod1，i=1 时选择解调器 Demod2，i=2 时选择解调器 Demod3…… i=7 时选择解调器 8。 参数 x 是指相位值（实数值，单位为°，单位不需要输入），输入范围是-180.00~180.00，分辨率是 0.01。 例如，发送 PHAS 0,-179.0 这条指令会设置解调器 1 相移值为-179.00°。而指令 PHAS?0 则是查询解调器 1 的相移值的指令。
DREF ? i	DREF 指令用于查询解调器的最终参考频率。 发送该指令时参数 i 必须设置，参数 i=0 时选择解调器 Demod1，i=1 时选择解调器 Demod2，i=2 时选择解调器 Demod3…… i=7 时选择解调器 8。 返回参数类型为浮点数，参数范围在 $10E^{-5}$~$1.5E^{6}$。返回的频率值=参考频率*谐波阶数。

6.2.4 信号输出通道配置指令

SSRC (?) {i}	SSRC 指令用于设置或查询 Sineout 和 TTLout 接口的频率基准源，i=0 时选择振荡器 OSC1，i=1 时选择振荡器 OSC2。
STTL (?) {i}	STTL 指令用于设置或查询<TTL Out>接口的输出状态，i=0 时选择关闭 TTLout 输出，i=1 时打开 TTLout 输出。
SIGO (?) {i}	SIGO 指令用于设置或查询<Sineout>接口的输出状态，i=0 时选择关闭 Sineout 输出，i=1 时打开 Sineout 输出。
SLVL (?) {x}	SLVL 指令用于设置或查询输出<Sineout>的正弦波电压幅值。 参数 x 指幅度电压（浮点数，单位：Vrms，单位不用输入）。参数 x 必须满足 100nVrms ≤ x ≤ 5Vrms，最小分辨率为 100nVrms。
SOFF (?) {x}	SOFF 指令用于设置或查询输出<Sineout>的输出直流偏置电压。 参数 x 指偏置电压值（浮点数，单位：V，单位不用输入）。参数 x 范围在-5V~5V，最小分辨率为 0.001V。
SPHS (?) {x}	SPHS 指令用于设置或查询<Sineout>的正弦波相对于振荡器的相移。 参数 x 是指相位值（浮点数，单位为°，单位不需要输入），输入范围是-180~180，分辨率是 0.01。
TPHS (?) {x}	TPHS 指令用于设置或查询<TTLout>的波形相对于振荡器的相移。 参数 x 是指相位值（浮点数，单位为°，单位不需要输入），输入范围是-180~180，分辨率是 0.01。
SMOD (?) {i}	SMOD 指令用于设置或查询<Sineout>的输出模式。 参数 i=0 时选择正弦波输出模式； i=1 时选择 AM 调制模式； i=2 时选择 FM 调制模式； i=3 时选择 PM 调制模式。 当选择 AM/FM/PM 调试模式时，载波的幅值和频率信息与正弦波模式时的幅值和频率保持一致，而调制波的深度和频率将由其他指令控制。
MARF (?) {f}	MARF 指令用于设置或查询<Sineout>调制模式的内部频率。 参数 f 值可设置范围 $10E^{-5}$~$1.5E^{6}$，最小分辨率为 $1E^{-9}$。

AMSR (?) {i}	AMSR 指令用于设置或查询 AM 调制信号的频率源。 参数 i=0 时选择振荡器 OSC1 的频率值； i=1 时选择振荡器 OSC2 的频率值； i=2 时选择调制模式的内部频率，即 MARF 设置的频率值。
AMDP (?) {x}	AMDP 指令用于设置或查询 AM 调制信号的调制深度。 参数 x 的输入范围是 0~1 的浮点数，表示调制信号与载波信号的幅值的百分比例，例如设置 AMDP 1 时，表示调制信号与载波信号的幅值相同。
FMSR (?) {i}	FMSR 指令用于设置或查询 FM 调制信号的频率源。 参数 i=0 时选择振荡器 OSC1 的频率值； i=1 时选择振荡器 OSC2 的频率值； i=2 时选择调制模式的内部频率，即 MARF 设置的频率值。
FMDV (?) {f}	FMDV 指令用于设置或查询 FM 调制信号的峰值频率偏差。 参数 f 值可设置范围 $10E^{-5}$~$1.5E^{6}$，最小分辨率为 $1E^{-9}$。
PMSR (?) {i}	PMSR 指令用于设置或查询 AM 调制信号的频率源。 参数 i=0 时选择振荡器 OSC1 的频率值； i=1 时选择振荡器 OSC2 的频率值； i=2 时选择调制模式的内部频率，即 MARF 设置的频率值。
PMDV (?) {x}	PMDV 指令用于设置或查询 PM 调制信号的相位偏差值。 参数 x 是指相位值（浮点数，单位为°，单位不需要输入），输入范围是 0~360，分辨率是 0.01。

6.2.5 Channel 通道输出指令

COUT (?) i {, j}

COUT 指令用于设置或查询 OE2011/OE2021 后面板的 CHOUT 输出通道的信号源。

发送该指令时参数 i 必须设置，i=0 时选择 CH1；i=1 时选择 CH2。

参数 j 用于选择输出值的类型。

具体如下：

i	CH 通道源
0	DC OUT
1	X-Demod1
2	Y-Demod1
3	R-Demod1
4	θ-Demod1
5	X-Demod2
6	Y-Demod2
7	R-Demod2
8	θ-Demod2
9	X-Demod3
10	Y-Demod3
11	R-Demod3
12	θ-Demod3
13	X-Demod4
14	Y-Demod4
15	R-Demod4
16	θ-Demod4
17	X-Demod5
18	Y-Demod5
19	R-Demod5
20	θ-Demod5
21	X-Demod6
22	Y-Demod6
23	R-Demod6
24	θ-Demod6
25	X-Demod7
26	Y-Demod7
27	R-Demod7
28	θ-Demod7
29	X-Demod8
30	Y-Demod8
31	R-Demod8
32	θ-Demod8
33	AUXIN1
34	AUXIN2
35	AUXIN3
36	AUXIN4

<table>
<tr><td>CHDC(?) i {, x}</td><td>CHDC 指令用于设置或查询 CHOUT 通道的 DC OUT 模式的电压值。
参数 i 对应 CH 的通道，i=0 时对应 CHOUT1，i=1 时对应 CHOUT2。
参数 x 用于设置输出的电压值（单位是 V，不需要输入单位），范围是-10.000≤ x ≤10.000，最小分辨率是 0.001。
例如发送指令 CHDC 1,5.00，会设置<CHOUT1>的 DC OUT 模式的输出值为 5.00V。</td></tr>
<tr><td>SENS (?) i {,j}</td><td>SENS 指令用于设置或查询 CHOUT 通道的灵敏度<sensitivity>。
参数 i 对应 CH 的通道，i=0 时对应 CHOUT1，i=1 时对应 CHOUT2。
参数 j 用于选择不同的量程。
具体如下：
<table>
<tr><th>j/sensitivity</th><th>j/sensitivity</th></tr>
<tr><td>0: 1 nV/pA</td><td>15: 100 µV/nA</td></tr>
<tr><td>1: 2 nV/pA</td><td>16: 200 µV/nA</td></tr>
<tr><td>2: 5 nV/pA</td><td>17: 500 µV/nA</td></tr>
<tr><td>3: 10 nV/pA</td><td>18: 1 mV/µA</td></tr>
<tr><td>4: 20 nV/pA</td><td>19: 2 mV/µA</td></tr>
<tr><td>5: 50 nV/pA</td><td>20: 5 mV/µA</td></tr>
<tr><td>6: 100 nV/pA</td><td>21: 10 mV/µA</td></tr>
<tr><td>7: 200 nV/pA</td><td>22: 20 mV/µA</td></tr>
<tr><td>8: 500 nV/pA</td><td>23: 50 mV/µA</td></tr>
<tr><td>9: 1 µV/nA</td><td>24: 100 mV/µA</td></tr>
<tr><td>10: 2 µV/nA</td><td>25: 200 mV/µA</td></tr>
<tr><td>11: 5 µV/nA</td><td>26: 500 mV/µA</td></tr>
<tr><td>12: 10 µV/nA</td><td>27: 1 V/mA</td></tr>
<tr><td>13: 20 µV/nA</td><td>28: 2 V/mA</td></tr>
<tr><td>14: 50 µV/nA</td><td>29: 5 V/mA</td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td>COFP (?) i {, x}</td><td>COFP 指令用于设置或查询 CHOUT 通道输出的偏置值。
参数 i 对应 CH 的通道，i=0 时对应 CHOUT1，i=1 时对应 CHOUT2。
参数 x 用于设置偏置值（单位是%），范围是-100.00≤x ≤100.00，最小分辨率为 0.01。</td></tr>
<tr><td>CEXP (?) i {,x}</td><td>CEXP 指令用于设置或查询 CHOUT 通道输出的放大倍数值。
参数 i 对应 CH 的通道，i=0 时对应 CHOUT1，i=1 时对应 CHOUT2。
参数 x 用于设置输出放大倍数，范围是 0.001≤x ≤10000 的浮点数，最小分辨率是 0.001。</td></tr>
</table>

6.2.6 辅助输出指令

AUXV (?) i {,x}	AUXV 指令用于设置或查询后面板 AUXOUT 接口的输出值。 发送该指令时参数 i 必须设置，参数 i=0 时选择 AUX-IN 1，i=1 时选择解调器 AUX-IN 2，i=2 时选择解调器 AUX-IN 3，i=3 时选择 AUX-IN 4。 参数 x 用于设置输出的电压值（单位是 V，不需要输入单位），范围是-10.000≤ x ≤10.000，最小分辨率是 0.001。

6.2.7 自动设置指令

ARNG	ARNG 指令用于打开自动设置输入通道量程的功能。该指令作用与在菜单按下<Auto Range>作用相同。
APHS {i}	APHS 指令用于打开自动设置解调器的相位偏移功能。该指令作用和在菜单按下<Auto Phase>作用相同。 参数 i 可选，参数 i=0 时选择解调器 Demod1，i=1 时选择解调器 Demod2，i=2 时选择解调器 Demod3…… i=7 时选择解调器 8。若不输入参数 i，则自动设置全部 8 个解调器。 自动设置相位需要耗费一些时间。在自动设置完成之前，不要再次发送 APHS 指令。另外，如果相位不稳定，那么该指令将无效。 可以通过 PHAS?i; 指令来查询当前解调器的相位偏移值，以确定 APHS 指令有没有生效。
AFLT {i}	AFLT 指令用于打开自动设置解调器的滤波器功能。该指令作用和在菜单按下<Auto Filter>作用相同。 参数 i 可选，参数 i=0 时选择解调器 Demod1，i=1 时选择解调器 Demod2，i=2 时选择解调器 Demod3…… i=7 时选择解调器 8。若不输入参数 i，则自动设置全部 8 个解调器。
AOFP {i}	AOFP 指令用于打开自动设置 CHOUT 通道偏置值的功能。该指令作用和在菜单按下<Auto CH Offset>作用相同。 参数 i 可选，i=0 时选择 CHOUT1；i=1 时选择 CHOUT2。若不输入参数 i，则自动设置 2 个 CHOUT 通道。

6.2.8 保存读取设置指令

SSET i	SSET i 指令用于把 OE2011/OE2021 当前的设置保存到设置缓存区中，即 Setting buffer i(1≤i≤4)。 Setting buffer 里面的配置信息在 OE2011/OE2021 断电后可保存，用于下次开机后使用。
RSET i	RSET i 指令用于读取 Setting buffer i(0≤i≤4)里的设置。其中 i=0 表示<Default>默认设置，i=1~4 表示<S1>~<S4>的设置。读取成功后，OE2011/OE2021 内部参数将会被设置成与 Setting buffer i 里面相同的参数。

6.2.9 复位与 IDN 指令

*RST	RST 指令用于复位 OE2011/OE2021。设备内部的所有状态与参数都会重置为默认值，数据缓存区内的数据也会丢失。*号是为了补齐 4 位命令字符。
*IDN？	IDN ?指令用于查询 OE2011/OE2021 的 ID，格式为“SSI LIA-OE2011，SN:XXXXXX，VerXXX”。其中第一个为型号，如 OE2021；第二个为序列号，如 SN00001；第三个为硬件版本号，如 Ver1.00。*号是为了补齐 4 位命令字符。

6.2.10 数据和状态读取指令

OUTP ? i	OUTP ? i 指令用于读取单个测量值。参数 i 对应于下表。参数 i 的选择具体如下：

i	Parameter
0	X-Demod1
1	Y-Demod1
2	R-Demod1
3	θ-Demod1
4	X-Demod2
5	Y-Demod2
6	R-Demod2
7	θ-Demod2
8	X-Demod3
9	Y-Demod3
10	R-Demod3
11	θ-Demod3
12	X-Demod4
13	Y-Demod4
14	R-Demod4
15	θ-Demod4
16	X-Demod5
17	Y-Demod5
18	R-Demod5
19	θ-Demod5
20	X-Demod6
21	Y-Demod6
22	R-Demod6
23	θ-Demod6
24	X-Demod7
25	Y-Demod7
26	R-Demod7
27	θ-Demod7
28	X-Demod8
29	Y-Demod8
30	R-Demod8
31	θ-Demod8
32	Xnoise-Demod1
33	Ynoise-Demod1
34	Xnoise-Demod5
35	Ynoise-Demod5
36	Frequency-OSC1
37	Frequency-OSC2
38	AUXIN1
39	AUXIN2
40	AUXIN3
41	AUXIN4

<table>
<tr><td></td><td>所选参数的值以 ASCII 浮点数的格式返回，以伏特(V)、度(°)或赫兹(Hz)为单位，但单位不会输出。该指令仅用作查询。</td></tr>
<tr><td>SNAP ? i {,j,k,l,m,n,o,p……}</td><td>SNAP? 指令用于读取 OE2011/OE2021 在同一个时刻最多 20 个不同的测量值。
例如，指令 SNAP? 用于在同一时刻查询<X>、<Y>、<R>、<θ>或<F>等值，该功能在时间常数很短的时候非常实用。因为如果使用 OUTP?指令来连续读取两个不同的参数值，两个参数返回值之间会有一定的延时，使得读取的两个数据不是在同一时刻下测量所得，当数据变化速度较快时，就可能导致一定误差。
SNAP?i,j 指令需要至少 1 个参数，最多可以同时读取 20 个参数。参数的选择具体如下：
<table>
<tr><th>i,j,k,l,m,n,o,p……</th><th>Parameter</th></tr>
<tr><td>0</td><td>X-Demod1</td></tr>
<tr><td>1</td><td>Y-Demod1</td></tr>
<tr><td>2</td><td>R-Demod1</td></tr>
<tr><td>3</td><td>θ-Demod1</td></tr>
<tr><td>4</td><td>X-Demod2</td></tr>
<tr><td>5</td><td>Y-Demod2</td></tr>
<tr><td>6</td><td>R-Demod2</td></tr>
<tr><td>7</td><td>θ-Demod2</td></tr>
<tr><td>8</td><td>X-Demod3</td></tr>
<tr><td>9</td><td>Y-Demod3</td></tr>
<tr><td>10</td><td>R-Demod3</td></tr>
<tr><td>11</td><td>θ-Demod3</td></tr>
<tr><td>12</td><td>X-Demod4</td></tr>
<tr><td>13</td><td>Y-Demod4</td></tr>
<tr><td>14</td><td>R-Demod4</td></tr>
<tr><td>15</td><td>θ-Demod4</td></tr>
<tr><td>16</td><td>X-Demod5</td></tr>
<tr><td>17</td><td>Y-Demod5</td></tr>
<tr><td>18</td><td>R-Demod5</td></tr>
<tr><td>19</td><td>θ-Demod5</td></tr>
<tr><td>20</td><td>X-Demod6</td></tr>
<tr><td>21</td><td>Y-Demod6</td></tr>
<tr><td>22</td><td>R-Demod6</td></tr>
<tr><td>23</td><td>θ-Demod6</td></tr>
<tr><td>24</td><td>X-Demod7</td></tr>
<tr><td>25</td><td>Y-Demod7</td></tr>
<tr><td>26</td><td>R-Demod7</td></tr>
<tr><td>27</td><td>θ-Demod7</td></tr>
<tr><td>28</td><td>X-Demod8</td></tr>
<tr><td>29</td><td>Y-Demod8</td></tr>
<tr><td>30</td><td>R-Demod8</td></tr>
</table>
</td></tr>
</table>

	<table><tr><td>31</td><td>θ-Demod8</td></tr><tr><td>32</td><td>Xnoise-Demod1</td></tr><tr><td>33</td><td>Ynoise-Demod1</td></tr><tr><td>34</td><td>Xnoise-Demod5</td></tr><tr><td>35</td><td>Ynoise-Demod5</td></tr><tr><td>36</td><td>Frequency-OSC1</td></tr><tr><td>37</td><td>Frequency-OSC2</td></tr><tr><td>38</td><td>AUXIN1</td></tr><tr><td>39</td><td>AUXIN2</td></tr><tr><td>40</td><td>AUXIN3</td></tr><tr><td>41</td><td>AUXIN4</td></tr></table> 返回的值是一个单一的字符串，该字符串内不同值之间用逗号(,)分隔，并且顺序是按照发送指令时 i, j, k, l, m 的顺序返回。例如，发送 SNAP?0,1,36,3;会依次返回<X>、<Y>、<Frequency>和<θ>的值。这些值均放在同一个字符串中，例如： "0.951359,0.0253297,1000.00,1.234"。第一个是<X>值，第二个是<Y>值，第三个是频率值，第四个是<θ>值。 该指令对比 OUTP 指令好处是可以同时获取多个数据，这些数据都是同一时刻的，不会存在延时。
OAUX ? i	OAUX 指令用于查询后面板 AUX-IN 接口的输入电压值。 参数 i 必须设置，i=0 时读取 AUX-IN1；i=1 时读取 AUX-IN2；i=2 时读取 AUX-IN3；i=3 时读取 AUX-IN4。 查询返回结果以伏特(V)为单位，但单位不会输出。
INOV ?	INOV?; 指令用于查询 Input Overload 的状态。查询返回结果是 0 或者 1。其中 0 表示现在输入通道前级放大器没有溢出；1 表示输入通道前级放大器发生溢出，此时需要把输入信号减小以保护仪器不被损坏。
GNOV ?	GNOV?; 指令用于查询 Gain Overload 的状态。查询返回结果是 0 或者 1。其中 0 表示现在输入通道 ADC 没有溢出；1 表示输入通道 ADC 正发生溢出，此时需要把输入信号减小或者把输入量程调大，以保护仪器不被损坏。
*PLL ? i	*PLL?; 指令用于查询振荡器锁相环的状态。 参数 i 必须设置，i=0 时读取 OSC1 的锁相环的状态，i=1 时读取 OSC1 的锁相环的状态。查询返回结果是 0 或者 1，其中 0 表示现在锁相环没有锁定，或者是处于内部参考模式；1 表示锁相环已经锁定。

7. 性能测试

简介

本章旨在通过性能测试，使用户能够验证本设备的测量准确性，并据此增强对该设备的信赖度。所有测试的结果均可记录在本章末尾附带的性能测试记录表中。

序列号

若您有任何疑问并需与我们公司取得联系，请务必记录下设备的序列号，以便我们高效地进行资料登记。该序列号已清晰标注于设备背面及包装箱之上。此外，当设备启动后，您还可以通过访问<INFO>界面来查看序列号信息。

固件版本

设备开启后，通过访问<INFO>界面可以查看设备的固件版本号。

预热

鉴于设备内部芯片存在温漂现象，为确保测试结果的准确性，建议在测试前先行启动设备并进行预热（建议时间为 30 至 60 分钟），以有效减少误差。

测试记录

早本章节的末尾，附有一份性能测试记录表，旨在供用户详细记录仪器的各项性能参数，在正式填写之前最好先对记录表进行备份。

在完成所有测试并填写完记录表后，可以依据表中详尽的数据，全面评估设备的性能测试是否达到预期标准。请务必保存此记录表，便于未来与我们工程师沟通。

测试失败

若测试未能通过，请先仔细复核本设备及外部设备的所有设置是否准确无误。在设置核查无误并确保一切设置正确后，请对设备进行预热，并重新执行测试。若条件允许，建议尝试更换其他外部设备再次进行测试。

若测试仍旧失败，请记录下设备的序列号与固件版本号，并整理好性能测试记录表，随后及时与我们公司取得联系。

测试必要设备

1.函数信号发生器

Freq Range	1 Hz to 100 MHz
Freq Accuracy	Better than 2 ppm
Amplitude Accuracy	0.2dB from 1 Hz to 10 MHz
Spurious	≤-55 dBc
TTL SYNC	Available
Output Setup	50Ω or High Z
推荐	AGILENT 33500B series

2.数字万用表

Voltage Range	≥20 V，4 1/2 digits
Accuracy	≤0.005%
推荐	KEITHLEY 2100

3.直流稳压源

Voltage Range	≥10 V
Accuracy	＜10 mVpp
推荐	RIGOL DP831A

4.连接器

BNC 电阻	50 Ω
BNC-T 型连接器	

前面板液晶测试

请按照以下步骤操作设备：首先，打开背部电源开关以启动设备；随后，仔细观察液晶屏幕是否已成功点亮；最后，在屏幕界面上，请仔细检查屏幕是否存在任何坏点。

键盘测试

启动设备后，请尝试轻按任意一个按键，此时应该会听到设备发出清晰的“滴”声作为反馈。

接下来，逐一测试所有按键，并仔细观察屏幕上的显示，确认每次按键操作是否都能正确触发对应的设置变更。

最后，选中[DEMOD FILTER]菜单的<Demod.Select>设置项，通过旋转旋钮来验证旋钮是否能够正常工作并作出相应的调整反应。

7.1 启动测试

在进行其他性能测试之前，必须首先通过启动测试来全面检测锁相放大器的硬件功能，以确保其处于正常工作状态。

设备

在本测试中不需要外部设备。

步骤

1） 打开背部电源开关，启动锁相放大器；
2） 观察设备屏幕、键盘功能、背部散热风扇是否工作正常；
3） 在本章节末尾的测试记录表中，记录检测是否通过。

7.2 直流偏置

本项测试的目的是对输入端的直流偏置进行测试。

设备

使用 50 ΩBNC 电阻负载将 A 接口短路，将输入端短路后，锁相放大器能够测量自身的直流偏置。

步骤

1） 先关闭再打开背部电源开关，然后在<Recall>中读取<Default>设置；
2） 按以下顺序修改设置：
    <Osc.Mode>： 修改为<Internal>。
    <Osc.Frequency>：修改为 1 Hz。
    <Input Range>： 使用旋钮修改为<1 mV>。
3） 等待 10 秒后，记录<R>值；
4） 修改设置：
    <Coupling>： 修改为<DC>。
5） 等待 10 秒后，记录<R-Demod1>值；
6） 至此完成直流偏置测试，在本章最后的测试记录表中填入数据。

7.3 共模抑制

本项测试的目的是对锁相放大器的共模抑制比进行测试。

设备

我们使用本设备产生的正弦波作为输出来提供信号。

连接锁相放大器的 SINE OUT 输出端与 A、B 输入端。把 BNC T 型接头插到 SINE OUT 接口上，使用 2 条等长的信号线（BNC 公对公）分别连接 T 型头与 A、B 接口。

步骤

1） 先关闭再打开背部电源开关，然后在<Recall>中读取<Default>设置；
2） 按以下顺序修改设置：
<Input Range>： 使用旋钮修改为<1 V>。
<Osc.Mode>： 修改为<Internal>。
<Osc.Frequency>：修改为 100 Hz。
<Sineout SW>： 修改为<ON>。
<Amplitude>： 修改为 1 Vrms。
3） 等待<R>值稳定，<R>值应该为 1.000 Vrms（3%误差内）；
4） 按以下顺序修改设置：
<Coupling>： 修改为<DC>。
<Input Port>： 修改为<A-B>。
5） 等待 10 秒后，记录<R-Demod1>值；
6） 至此完成共模抑制的测试，计算共模抑制比 CMRR = 20lg(1.0/R)。在本章最后的测试记录表中填入数据。

7.4 幅值精度与平坦度

本项测试的目的是对锁相放大器的各个量程精度和频率响应进行测试。

设备

我们使用函数信号发生器提供精准的频率和正弦波。

使用一条信号线（BNC 公对公）连接函数信号发生器的输出接口到锁相放大器的 A 接口，使用另一条信号线连接函数信号发生器的同步信号接口和锁相放大器的 REF IN 1 接口。

设置函数信号发生器：

函数： 正弦波
频率： 1 kHz
幅值： 1 Vrms
偏置： 0 V
输出： High-Z
扫频： off

调制： none

步骤

1） 先关闭再打开背部电源开关，然后在<Recall>中读取<Default>设置；
2） 修改设置：
<Filter dB/oct>： 修改为 24 dB/oct。
3） 幅值精度的测试需要保持函数信号发生器的频率为 1 kHz，按以下顺序修改其幅值和锁相放大器的<Input Range>：

Input Range	Amplitude
5 V	2.5000 Vrms
1 V	500.00 mVrms
200 mV	100.00 mVrms
50 mV	25.000 mVrms
10 mV	5.000 mVrms
2 mV	1.000 mVrms
1 mV	1.000 mVrms

a） 设置函数信号发生器的幅值；
b） 等待 10 秒后，记录<R>值，然后测试另外一组数据；
c） 重复 3a 到 3b 直到完成幅值精度测试。
4） 频率响应的测试在大于 1 kHZ 的频率下进行，按以下顺序修改函数发生器的频率：

Test Frequency
1.2 kHz
12 kHz
120 kHz
1.2 MHz

a） 设置函数信号发生器幅值为 100.00 mVrms；
b） 设置锁相放大器的<Input Range>为<200 mV>；
c） 按顺序设置函数信号发生器的频率；
d） 等待 10 秒后，记录<R-Demod1>值，然后测试另外一组数据；
e） 重复 4c 到 4d 直到完成频率响应测试。
5） 至此完成幅值精度和频率响应的测试，在本章最后的测试记录表中填入数据。

7.5 幅值线性度

本项测试的目的是对锁相放大器的幅值线性度进行测试，验证锁相放大器在信号小于满量程的情况下的测量能力。

设备

我们使用函数信号发生器提供精准的频率和正弦波。

使用一条信号线（BNC 公对公）连接函数信号发生器的输出接口到锁相放大器的 A 接口，使用另一条信号线连接函数信号发生器的同步信号接口和锁相放大器的 REF IN 1 接口。

设置函数信号发生器：

函数： 正弦波
频率： 1 kHz
幅值： 1 Vrms
偏置： 0 V
输出： High-Z
扫频： off
调制： none

步骤

1) 先关闭再打开背部电源开关，然后在<Recall>中读取<Default>设置；
2) 修改设置：
   <Filter dB/oct>： 修改为<24 dB/oct>。
   <Input Range>： 使用旋钮修改为<1 V>。
3) 保持函数信号发生器的频率为 1 kHz，按以下顺序修改其幅值：

Amplitude
1.0000 Vrms
100.00 mVrms
10.000 mVrms
1.0000 mVrms

   a）设置函数信号发生器的幅值；
   b）等待 10 秒，记录<R-Demod1>值，然后测试另外一组数据；
   c）重复 3a 到 3b 直到完成所有数据测量。
4) 至此完成幅值线性度的测试，在本章最后的测试记录表中填入数据。

7.6 频率精度

本项测试的目的是对锁相放大器的频率精度进行测试。

设备

我们使用函数信号发生器提供参考信号。

使用一条信号线（BNC 公对公）连接函数信号发生器的参考信号接口和锁相放大器的 REF IN 接口。

步骤

1） 先关闭再打开背部电源开关，然后在<Recall>中读取<Default>设置；
2） 设置函数信号发生器的频率为 1 MHz；
3） 等待锁相放大器屏幕右下方的<PLL>由<UNLOCK>变为<LOCKED>后，记录<Freq>值；
4） 至此完成频率精度测试，在本章最后的测试记录表中填入数据。

7.7 Sine Out 幅值相位的精度与平坦度

本项测试的目的是对信号发生器产生的正弦波（Sine Out）的幅值相位精度与频率响应进行测试。

设备

使用一条 1 米长的信号线（BNC 公对公）连接 SINE OUT 接口和 A 接口。

步骤

1） 先关闭再打开背部电源开关，然后在<Recall>中读取<Default>设置；

2） 修改设置：

<Input Range>： 使用旋钮修改为<5 V>。

<Osc.Mode>： 修改为<Internal>。

<Osc.Frequency>：修改为 1 kHz。

<Sineout SW>： 修改为<ON>。

3） 幅值精度的测试需要保持内部参考信号的频率为 1 kHz，按以下顺序修改<Input Range>和 Sine 幅值<Amplitude>：

Input Range	Sineout Amplitude
5 V	1.6 Vrms
200 mV	0.160 Vrms
50 mV	0.016 Vrms
2 mV	0.0016 Vrms

a） 设置<Sineout>的幅值<Amplitude>；

b） 设置锁相放大器的<Input Range>；

c） 等待 10 秒后，记录<R-Demod1>值和<θ-Demod1>值，然后测试另外一组数据；

d） 重复 3a 到 3c 直到完成幅值精度测试。

4） 频率响应的测试在大于 1 kHz 的频率下进行，按以下顺序修改<Osc.Frequency>的值：

Test Frequency
1.2 kHz
12 kHz
120 kHz
1.2 MHz

a） 设置锁相放大器的<Input Range>为 200mV；

b） 设置<Sineout>的幅值<Amplitude>为 0.160Vrms；

c） 按顺序设置<Osc.Frequency>的值；

d） 等待 10 秒后，记录<R-Demod1>值和<θ-Demod1>值，然后测试另外一组数据；

e） 重复 4c 到 4d 直到完成频率响应测试。

5） 至此完成<Sine Out>幅值、相位的精度与频率响应的测试，在本章最后的测试记录表中填入数据。

7.8 直流输出和输入

本项测试主要测试锁相放大器的直流输出和输入的精度。

设备

我们使用线性直流稳压源作为直流输入。然后使用数字万用表来测量锁相放大器的直流输出。

步骤

1) 先关闭再打开背部电源开关，然后在<Recall>中读取<Default>设置；
2) 修改设置：
   <CH Source>：2 个 CH 通道源修改为<DC OUT>
3) 按以下步骤：
   a） 使用信号线连接后面板的 CHOUT1 接口到数字万用表，设置数字万用表量程为 19.999 V；
   b） 按以下列表顺序修改<DC OUT>中的值：

DC OUT（V）
10.000
5.000
0.000
-5.000
-10.000

   c） 等待 10 秒后，记录数字万用表读数，然后测试下一组数据；
   d） 重复 2b 到 2c，直到完成 CH1 的测试，然后换 CH2 连接到数字万用表，继续完成 CH2 的测试。
4) 按以下步骤：
   a) 使用信号线连接锁相放大器 AUXOUT 1 接口到数字万用表；
   b) 按以下列表顺序修改<AUX-OUT1>中的值：

AUXOUT（V）
10.000
5.000
0.000
-5.000
-10.000

   c) 等待 10 秒后，记录数字万用表读数，然后测试下一组数据；
   d) 重复 3b 到 3c，直到完成 AUXOUT1 的测试，然后依次连接 AUXOUT2、AUXOUT3、AUXOUT4 到数字万用表，完成 AUXOUT2、AUXOUT3、AUXOUT4 的测试。
5) 按以下步骤：
   a) 修改设置：[DISPLAY]子菜单中，修改<Monitor>为<Input>；
   b) 使用信号线连接直流稳压源的电压输出接口到锁相放大器 AUX-IN（后面板）中 1 接口；

c) 按以下顺序设置直流稳压源的输出电压：

Voltage（V）
10.000
5.000
0.000
-5.000
-10.000

d) 等待 10 秒后，记录屏幕上方<AUX-IN1>读数，然后测试下一组数据；

e) 重复 4c 到 4d，知道完成 AUX-IN1 的测试，然后依次连接直流稳压源输出接口到 AUX-IN2、AUX-IN3、AUX-IN4，完成 AUX-IN2、AUX-IN3、AUX-IN4 的测试。

6) 至此完成直流输出和输入的测试，在本章最后的测试记录表中填入数据。

7.9 输入噪声

本项测试主要测试锁相放大器的输入噪声。

设备

系统自身接地后，锁相放大器可以测量自身的输入噪声。

步骤

1) 先关闭再打开背部电源开关，然后在<Recall>中读取<Default>设置；
2) 按以下顺序修改设置：
   <Osc.Mode>： 修改为<Internal>。
   <Osc.Frequency>：修改为 993 Hz。
   <Input Range>： 使用旋钮修改为<1 mV>。
   <Time Constant>：修改为<10ms>
   <Filter dB/oct>： 修改为<24 dB/oct>。
   <Window Display>：修改为<X-Noise>。
3) 等待读数较为稳定后（约 2min），记录 X-Noise 值（取平均值）；
4) 依次修改以下参数：

<Ref.Frequency>
993 Hz
9.993 kHz
99.993 kHz
999.993 kHz

5) 至此完成输入噪声测试，在本章最后的测试记录表中填入数据。

7. 10 性能测试记录表

OE2011/OE2021 性能测试记录表

序列号：_____ 测试人员：_____

固件版本：_____ 日期：_____

仪器用途：_____

_____

1.启动测试

Pass	Fail
_____	_____

2.直流偏置

Input Coupling	Reading	Upper Limit
AC	_____	0.500 mV
DC	_____	0.500 mV

3.共模抑制

Frequency	Reading	Upper Limit
100 Hz	_____	1 mV

4.幅值精度和平坦度

Input Range	Amplitude	Lower Limit	Reading	Upper Limit
5 V	2.5000 Vrms	2.4250 V	_____	2.5750 V
1 V	500.00 mVrms	485.00 mV	_____	515.00 mV
200 mV	100.00 mVrms	97.00 mV	_____	103.00 mV
50 mV	25.000 mVrms	24.25 mV	_____	25.75 mV
10 mV	5.0000 mVrms	4.850 mV	_____	5.150 mV
2 mV	1.0000 mVrms	0.970 mV	_____	1.030 mV
1 mV	1.0000 mVrms	0.970 mV	_____	1.030 mV

Input Range	Frequency	Lower Limit	Reading	Upper Limit
200 mV	1.2 kHz	97 mV	_____	103 mV
200 mV	12 kHz	97 mV	_____	103 mV
200 mV	120 kHz	97 mV	_____	103 mV
200 mV	1.2 MHz	97 mV	_____	103 mV

5.幅值线性度

Sensitivity	Amplitude	Lower Limit	Reading	Upper Limit
1 V	1.0000 Vrms	0.9700 V	_____	1.0300 V
	100.00 mVrms	0.0970 V	_____	0.1030 V
	10.000 mVrms	9.700 mV	_____	10.30 mV
	1.0000 mVrms	0.970 mV	_____	1.030 mV

OE2011/OE2021 性能测试记录表

6.频率精度

	Frequency	Lower Limit	Reading	Upper Limit
Ref In 1	1 MHz	0.99999 MHz	_____	1.00001 MHz
Ref In 2	1 MHz	0.99999 MHz	_____	1.00001 MHz

7.Sine Out 幅值相位的精度与平坦度

Input Range	SineOut Ampl.	Lower Limit	Reading	Upper Limit
5 V	1.600Vrms	1.568 Vrms	R：_____	1.632 Vrms
		-2.000 °	θ：_____	+2.000 °
200 mV	160 mVrms	156.8 mVrms	R：_____	163.2 mVrms
		-2.000 °	θ：_____	+2.000 °
50 mV	16 mVrms	15.68 mVrms	R：_____	16.32 mVrms
		-2.000 °	θ：_____	+2.000 °
2 mV	1.6 mVrms	1.568 mVrms	R：_____	1.632 mVrms
		-2.000 °	θ：_____	+2.000 °

SineOut Ampl.	Frequency	Lower Limit	Reading	Upper Limit
160.0 mVrms	1.2 kHz	1.568 Vrms	R：_____	1.632 Vrms
		-2.000 °	θ：_____	+2.000 °
	12 kHz	156.8 mVrms	R：_____	163.2 mVrms
		-2.000 °	θ：_____	+2.000 °
	120 kHz	15.68 mVrms	R：_____	16.32 mVrms
		-2.000 °	θ：_____	+2.000 °
	1.2 MHz	1.568 mVrms	R：_____	1.632 mVrms
		-2.000 °	θ：_____	+2.000 °

8.直流输出与输入

Output	DC OUT	Lower Limit	Reading	Upper Limit
CHOUT1	100.00	9.960 V	_____	10.040 V
	50.00	4.960 V	_____	5.040 V
	0.00	-0.030 V	_____	0.030 V
	-50.00	-5.040 V	_____	-4.960 V
	-100.00	-10.040 V	_____	-9.960 V

Output	DC OUT	Lower Limit	Reading	Upper Limit
CHOUT2	100.00	9.960 V	_____	10.040 V
	50.00	4.960 V	_____	5.040 V
	0.00	-0.030 V	_____	0.030 V
	-50.00	-5.040 V	_____	-4.960 V
	-100.00	-10.040 V	_____	-9.960 V

OE2011/OE2021 性能测试记录表

8.直流输出与输入（续前表）

Output	Voltage	Lower Limit	Reading	Upper Limit
AUX OUT 1	10.000	9.960 V	_____	10.040 V
	5.000	4.960 V	_____	5.040 V
	0.000	-0.030 V	_____	0.030 V
	-5.000	-5.040 V	_____	-4.960 V
	-10.000	-10.040 V	_____	-9.960 V

Output	Voltage	Lower Limit	Reading	Upper Limit
AUX OUT 2	10.000	9.960 V	_____	10.040 V
	5.000	4.960 V	_____	5.040 V
	0.000	-0.030 V	_____	0.030 V
	-5.000	-5.040 V	_____	-4.960 V
	-10.000	-10.040 V	_____	-9.960 V

Output	Voltage	Lower Limit	Reading	Upper Limit
AUX OUT 3	10.000	9.960 V	_____	10.040 V
	5.000	4.960 V	_____	5.040 V
	0.000	-0.030 V	_____	0.030 V
	-5.000	-5.040 V	_____	-4.960 V
	-10.000	-10.040 V	_____	-9.960 V

Output	Voltage	Lower Limit	Reading	Upper Limit
AUX OUT 4	10.000	9.960 V	_____	10.040 V
	5.000	4.960 V	_____	5.040 V
	0.000	-0.030 V	_____	0.030 V
	-5.000	-5.040 V	_____	-4.960 V
	-10.000	-10.040 V	_____	-9.960 V

OE2011/OE2021 性能测试记录表

8.直流输出与输入（续前表）

Intput	Voltage	Lower Limit	Reading	Upper Limit
AUX IN 1	10.000	9.960 V	_____	10.040 V
	5.000	4.960 V	_____	5.040 V
	0.000	-0.030 V	_____	0.030 V
	-5.000	-5.040 V	_____	-4.960 V
	-10.000	-10.040 V	_____	-9.960 V

Intput	Voltage	Lower Limit	Reading	Upper Limit
AUX IN 2	10.000	9.960 V	_____	10.040 V
	5.000	4.960 V	_____	5.040 V
	0.000	-0.030 V	_____	0.030 V
	-5.000	-5.040 V	_____	-4.960 V
	-10.000	-10.040 V	_____	-9.960 V

Intput	Voltage	Lower Limit	Reading	Upper Limit
AUX IN 3	10.000	9.960 V	_____	10.040 V
	5.000	4.960 V	_____	5.040 V
	0.000	-0.030 V	_____	0.030 V
	-5.000	-5.040 V	_____	-4.960 V
	-10.000	-10.040 V	_____	-9.960 V

Intput	Voltage	Lower Limit	Reading	Upper Limit
AUX IN 4	10.000	9.960 V	_____	10.040 V
	5.000	4.960 V	_____	5.040 V
	0.000	-0.030 V	_____	0.030 V
	-5.000	-5.040 V	_____	-4.960 V
	-10.000	-10.040 V	_____	-9.960 V

9.输入噪声

Frequency	Input Range	Reading	Upper Limit
993 Hz	1 mV	_____	6 nV/√Hz
9.993 kHz		_____	4 nV/√Hz
99.993 kHz		_____	4 nV/√Hz
999.993 kHz		_____	4 nV/√Hz

8. 操作实例

8.1 基本信号测量

本操作实例将简单演示如何使用 OE2011/OE2021 测量信号的 R、θ、X 以及 Y 值。你需要准备两条带 BNC 接头的信号线用于输入待测信号及参考信号。现在我们举例使用函数信号发生器产生一个幅值为 100 mVrms、频率为 1 MHz 的正弦波，并用 OE2011/OE2021 进行测量。步骤如下：

1. 断开所有与机箱连接的信号线，接入电源，打开电源开关，此时系统处于默认设置状态。
2. 用一条带 BNC 接头的信号线连接函数信号发生器的输出接口和 OE2011/OE2021 前面板 SIGNAL IN 的 A 接口，用另一条带 BNC 接头的信号线连接函数信号发生器的同步参考信号接口和 OE2011/OE2021 前面板的 REF IN 接口，如图 69 所示：

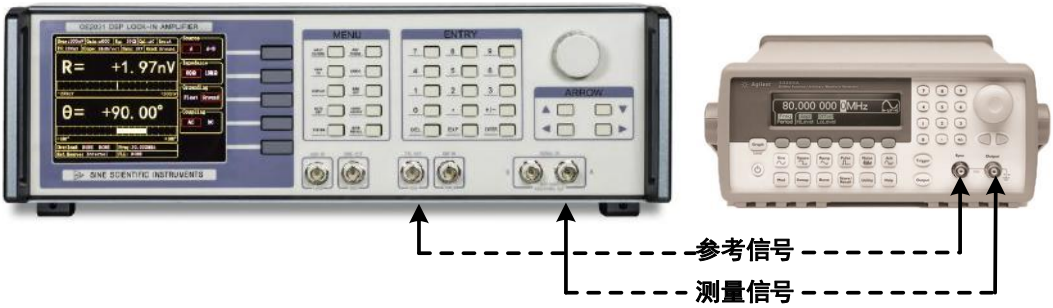


图69. 信号线连接图

3. 打开函数信号发生器电源，将参数设置为“波形：正弦波”、“幅值：100 mVrms”、“频率：1 MHz”、“输出阻抗：高阻”，待测信号的参数如图 70 所示：

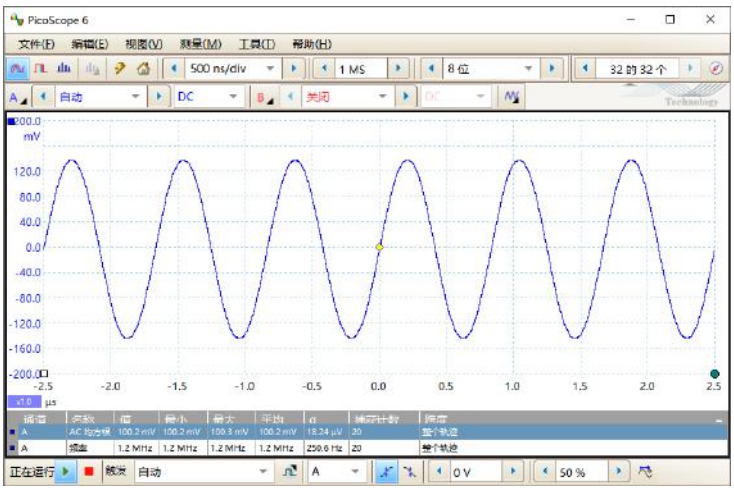


图70. 待测信号波形图

4. 开启函数信号发生器的输出，观察主界面中状态栏的<Overload>是否提示溢出：

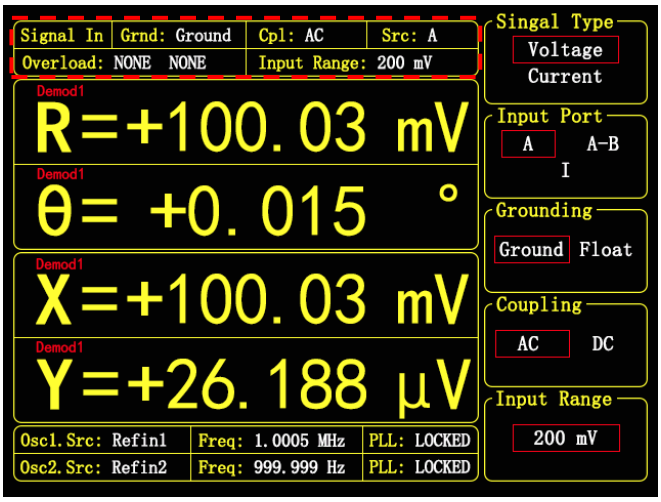


图71. 主界面状态栏

若前级输入溢出，则显示 Overload: INPUT NONE；若放大溢出，则显示 Overload: NONE GAIN；若同时溢出，则显示 Overload: INPUT GAIN。

前级溢出时应立即减小数字信号发生器输出幅值，放大溢出应立即调节增益值（OE2011/OE2021 输入端峰值高于 8 V 或谷值低于-8 V 时发生前级溢出，因此本例中数字信号发生器输出幅值为 100mVrms 的正弦波时不会发生溢出，但是测量其他信号时要注意溢出情况）。调节灵敏度值的方法见下。

5. 调节输入量程。按下前面板[SIGNAL INPUT]按键进入子菜单。

图72. [SIGNAL INPUT]菜单位置

[SIGNAL INPUT]子菜单界面如下：

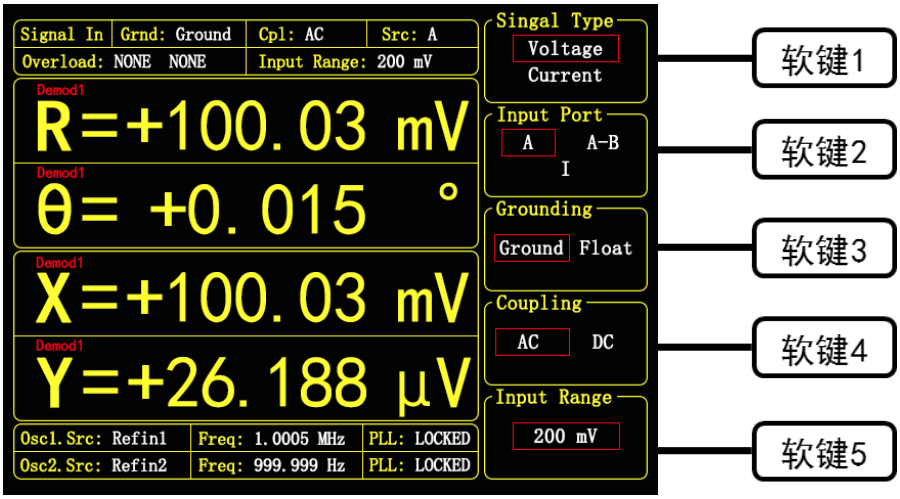


图73. [SIGNAL INPUT]菜单界面

按下“软键 5”以选中<Input Range>功能，选中区域会有高亮显示，通过旋转旋钮调节< Input Range >值，使测量信号值尽量满偏而不溢出。此处我们调节为<200 mV>即可。至此，我们即简单测出了从函数信号发生器输送过来的正弦波，如图 73 所示，测量出来的数据为：R=100.03 mV，θ=0.015°。

6. 主界面数据栏显示<R>、<θ>、<X>及<Y>值。按下前面板[DISPLAY]按键进入子菜单。

图74. [DISPLAY]菜单位置

DISPLAY 子菜单界面如下：

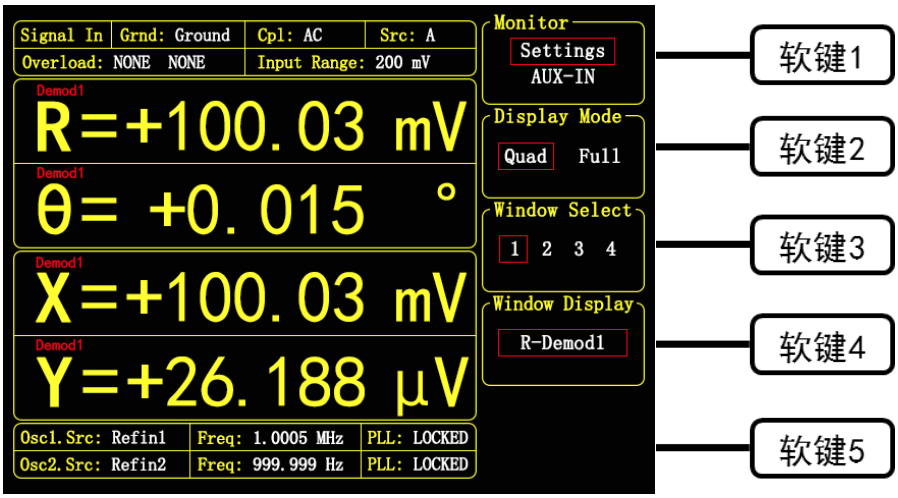


图75. [DISPLAY]菜单界面

系统默认设置中，数据栏从上往下显示<R>、<θ>、<X>、<Y>值，通过以下介绍的方法可更改显示的数值。在[Display]子菜单按下“软键 3”，选中 Window 3 菜单，然后按下“软键 4”，选中< Window Display>菜单，通过旋钮选择改成“X-Demod4”值。修改完成后如图 76 所示，通过此方法可以查看想要的测量结果。

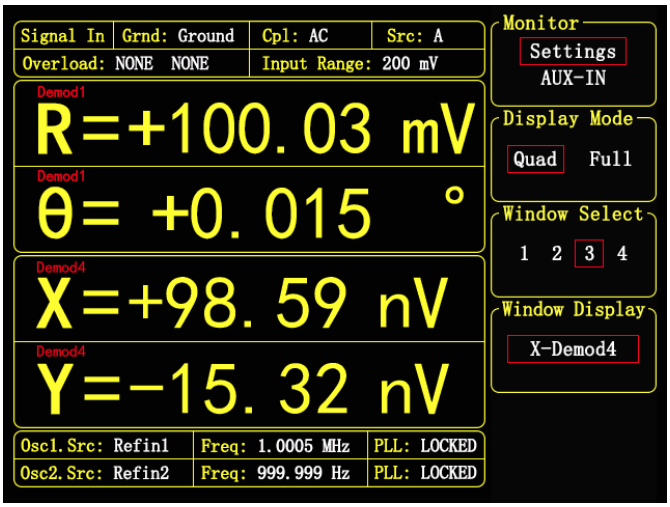


图76. 修改 X\Y 显示图

8.2 谐波测量

本实例将演示如何测量输入信号的谐波分量值。你需要准备两条带 BNC 接头的信号线用于输入待测信号及参考信号。我们举例使用函数信号发生器产生一个幅值为 160mVpp、频率为 1 kHz 的方波，并用 OE2011/OE2021 进行测量其 1、2、3、4、5、6、7、8 次谐波。步骤如下：

1. 断开所有与机箱连接的信号线，接入电源，打开电源开关，此时系统处于默认设置状态。
2. 用一条带 BNC 接头的信号线连接函数信号发生器的输出接口和 OE2011/OE2021 前面板

SIGNAL IN 的 A 接口，用另一条带 BNC 接头的信号线连接函数信号发生器的参考信号接口和前面板的 REF IN 接口，如图 77 所示：

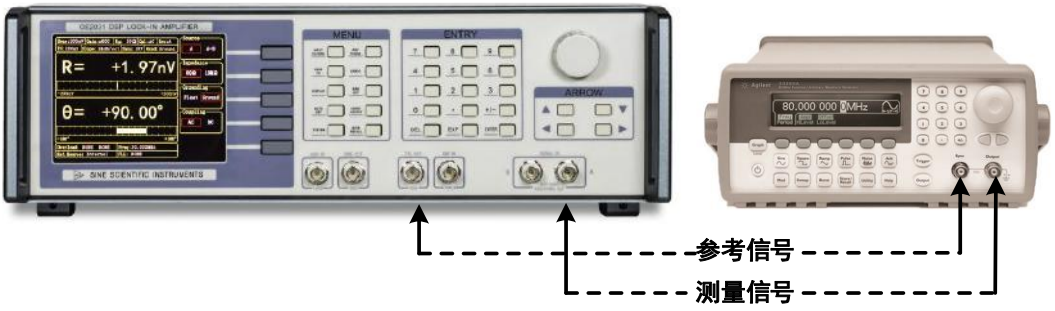


图77. 信号线连接图

3. 打开函数信号发生器电源，将参数设置为“波形：方波”、“幅值：160 mVpp”、“频率：1kHz”，待测信号的参数如图 78 所示：

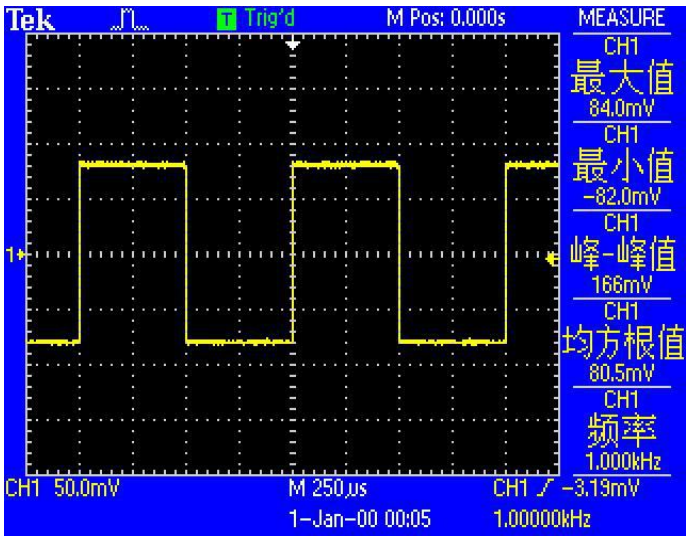


图78. 待测信号参数图

4. 按下前面板[DEMOD REF]按键进入子菜单。

图79. [DEMOD]子菜单位置

[DEMOD REF]子菜单界面如下：

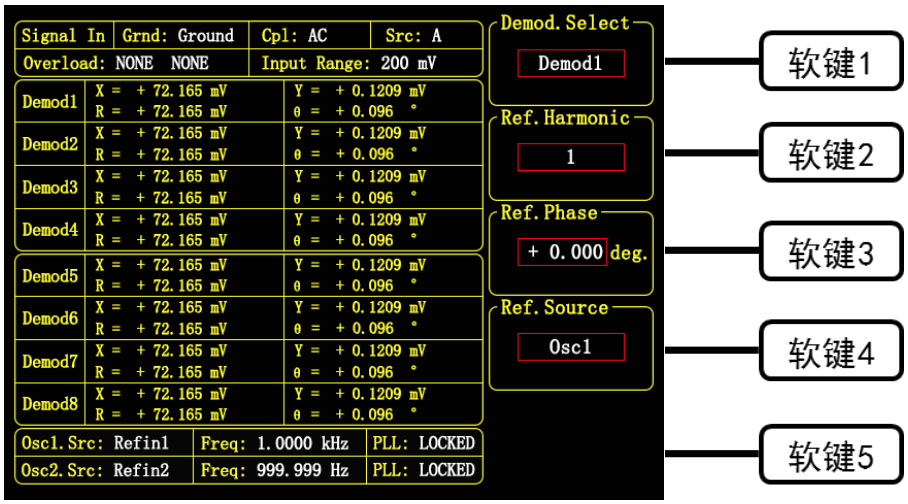


图80. DEMOD REF 子菜单

其中<Ref.Harmonic >菜单中设置各个解调器测量的谐波阶数，使用键盘输入可选择所需阶次。

同时测量输入方波的 1、2、3、4、5、6、7、8 次谐波的操作方法：在[DEMOD REF]子菜单中，按下“软键 1”切换选择 8 个解调器通道，按下“软键 2”选中谐波设置窗口，可以修改当前解调器通道的谐波阶数，分别设置解调器 1 至 8 的谐波阶数为 1 至 8。

然后在[DISPLAY]子菜单中，按下“软键 2”，把<Display Mode>设置为<Full>模式，即可如图 81 所示，显示所有基波和谐波的测量结果。

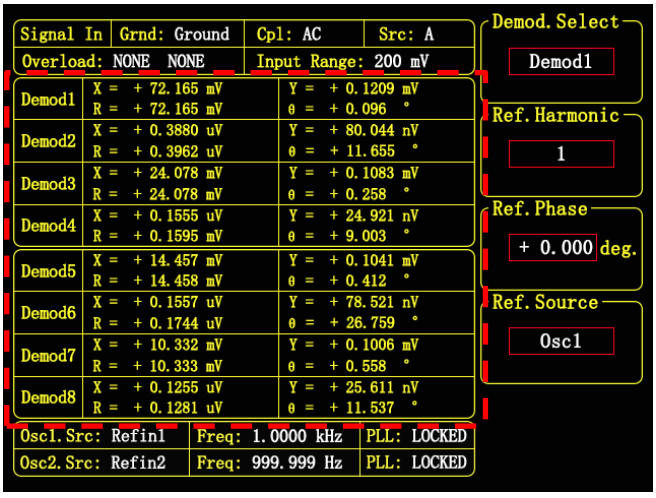


图81. 方波的谐波测量结果

方波的谐波理论值计算：设方波的峰峰值为 E，角频率为 ω，则经过傅里叶展开之后得到：

$$f(t)=\frac{2E}{\pi}\left(\sin(\omega t)+\frac{1}{3}\sin(3\omega t)+\frac{1}{5}\sin(5\omega t)\cdots+\frac{1}{n}\sin(n\omega t)\right)$$

其 n 次谐波即为正弦波：

$$f(t)=\frac{2E}{n\pi}\sin(n\omega t)$$

因此得到 n 次谐波的有效值为：

$$R = \frac{\sqrt{2}E}{n\pi}$$

在本实例中，方波峰峰值 E 为 160mV，则

1 次谐波计算值为：$R = \frac{\sqrt{2}\times 160}{1\times\pi}\text{mV} \approx 72.025\ \text{mV}$

3 次谐波计算值为：$R = \frac{\sqrt{2}\times 160}{3\times\pi}\text{mV} \approx 24.008\ \text{mV}$

5 次谐波计算值为：$R = \frac{\sqrt{2}\times 160}{5\times\pi}\text{mV} \approx 14.405\ \text{mV}$

7 次谐波计算值为：$R = \frac{\sqrt{2}\times 160}{7\times\pi}\text{mV} \approx 10.289\ \text{mV}$

而 2、4、6、8 次谐波理论值则为 0V。

根据以上算法，即可将测量值与理论计算值进行对比。如图 81 的测量结果所示，测量值符合理论值。

8.3 AM 解调测量

AM 调制，是使载波的振幅按照所需传送信号的变化规律而变化,但频率保持不变的调制方法。其调制后的信号传播距离远，但是抗干扰能力较差。

调制信号： $U_m(t) = A_m * \cos\omega_m t$

载波信号： $U_c(t) = A_c * \cos\omega_c t$

调制后的信号为：

$$U(t) = (A_c + A_m\cos\omega_m t) * \cos\omega_c t$$
$$= A_c * \left(1 + \frac{A_m}{A_c}\cos\omega_m t\right) * \cos\omega_c t$$

其中 A_C 是载波的幅值， ω_C 是载波的频率；A_m 是调制波的幅值， ω_m 是调制波的频率；定义调幅深度$m = \frac{A_m}{A_c}$。

进一步转换：

$$U(t) = A_c * (1 + m\cos\omega_m t) * \cos\omega_c t$$
$$= A_c * \cos\omega_c t + \frac{mA_c}{2} * \cos(\omega_c - \omega_m)t + \frac{mA_c}{2} * \cos(\omega_c + \omega_m)t$$

可以观察出 AM 调制信号有 3 个频率信息，分别是ω_c、$\omega_c - \omega_m$和$\omega_c + \omega_m$，利用锁相放大器的三个解调器同时解调这 3 个频率信息，可还原出A_c和$\frac{mA_c}{2}$的结果，即可得到载波和调制波的幅值信息。

实际解调操作如下：

1. 函数发生器设置 AM 调制模式，设置 100kHz、200mVrms 的正弦波作为载波，设置 10kHz、100%的调幅深度的正弦波作为调制波。注意，函数发生器 AM 调制模式时，无论调幅深度设置多少，载波幅值都会减少一半，比如当前设置 200mVrms，实际只有 100mVrms 的幅度。

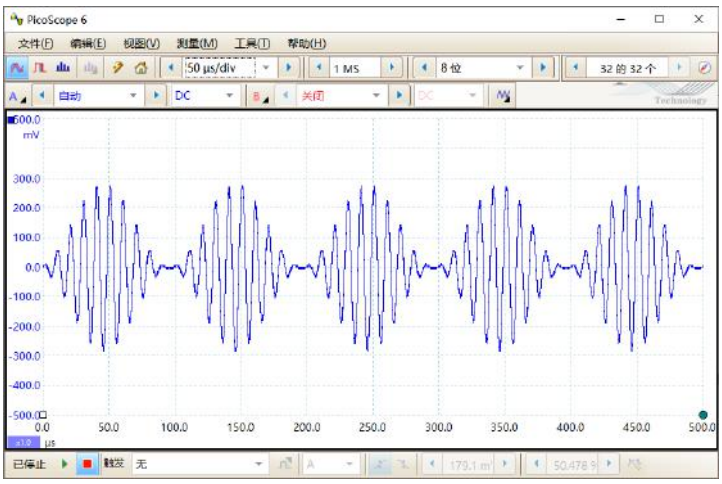


图82. AM 调制信号的波形

2. OE2021 按下前面板[DEMOD REF]按键进入子菜单。
3. 分别设置：
   解调器 Demod1 的<Ref.Source>为<Osc1>；
   解调器 Demod2 的<Ref.Source>为<Frequency>，<Frequency Set>为 90.0000kHz；
   解调器 Demod3 的<Ref.Source>为<Frequency>，<Frequency Set>为 110.000kHz；
   此时 OE2021 的 3 个解调器将分别解调 100kHz、90kHz 和 110kHz 的频率分量，结果结果如图 83 所示：

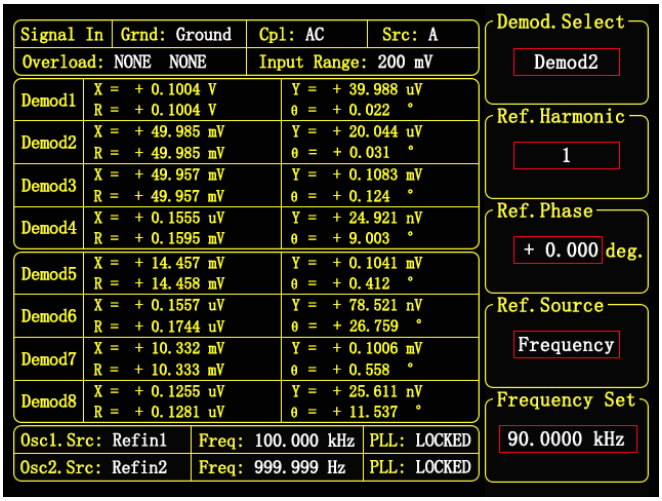


图83. AM 解调器测量结果

4. 得到结果 R-Demod1=100.4mVrms，R-Demod2=49.985mVrms，R-Demod3=49.957mVrms，换算的载波幅值为 100.4mVrms，调制波幅值为 99.942mVrms，调制深度为 99.54%，与理论预期符合。

8.4 某任意光源光谱测量

本实例将演示如何测量一个任意光源的光谱。你需要准备好光谱测量的有关仪器，包括光学斩波器(SIGNAL RECOVERY Model 197 Light Chopper)、光栅单色仪(WDG15-Z)及其控制系统、光电探头(电探头采用日本 Hamamatsu 公司 S2386 系列的 Si 光敏二极管)、数据采集平

台（NI cDAQ-9172 数据采集平台）和 PC 等，控制单色仪在其光谱测量范围内自动扫描，并用 OE2011/OE2021 对光电流进行测量。步骤如下：

1. 断开所有与机箱连接的信号线，接入电源，打开电源开关，此时系统处于默认设置状态。
2. 设置 OE2011/OE2021 的相关参数：
   (1) 在前面板菜单栏中选择[INPUT/FILTERS]键进入子菜单，选择<I>电流输入模式，电流增益设置为<1 M>，其它设置为默认状态；
   (2) 选择[REF/PHASE]键进入子菜单，参考信号源选择<External>，信号源类型选择<TTL>；
   (3) 选择[GAIN/TC]键进入子菜单，在第一次测量时满偏灵敏度设置为最大值<1 uA>，在随后的测量中可以根据实际适当调小；动态储备设置为<Normal>；时间常数设置为<300 ms>；低通滤波器陡降设置为<12 dB/oct>；关闭同步滤波器；
   (4) 选择[OUTPUT/OFFSET]进入子菜单，选择输出通道一<CH1>，信号源选择<R>，输出速度设置为<Fast>；
3. 搭建起光谱测量平台，并用一条带 BNC 接头的信号线连接光电探头的输出接口和前面板 SIGNAL IN 的 A 接口；用另一条带 BNC 接头的信号线连接光学斩波器的同步频率信号输出接口 Sync out f1 和前面板的 REF IN 接口；用一条带 BNC 接头的信号线连接后面板的 CH1 接口和数据采集平台，示意图如图 84 所示：

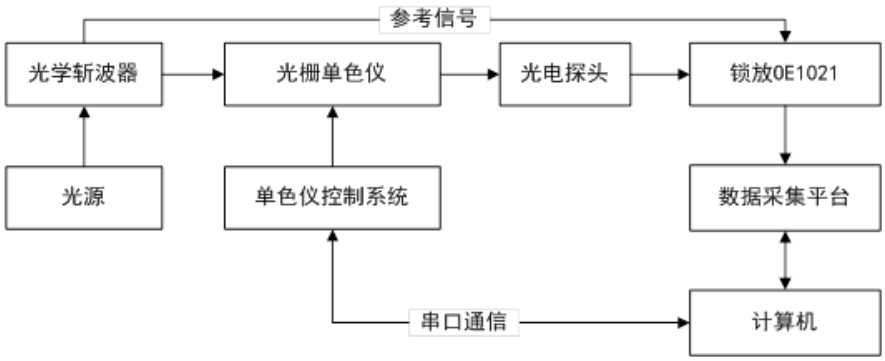


图84. 光谱测量平台示意图

该平台的实际连接图如下图 85 所示：

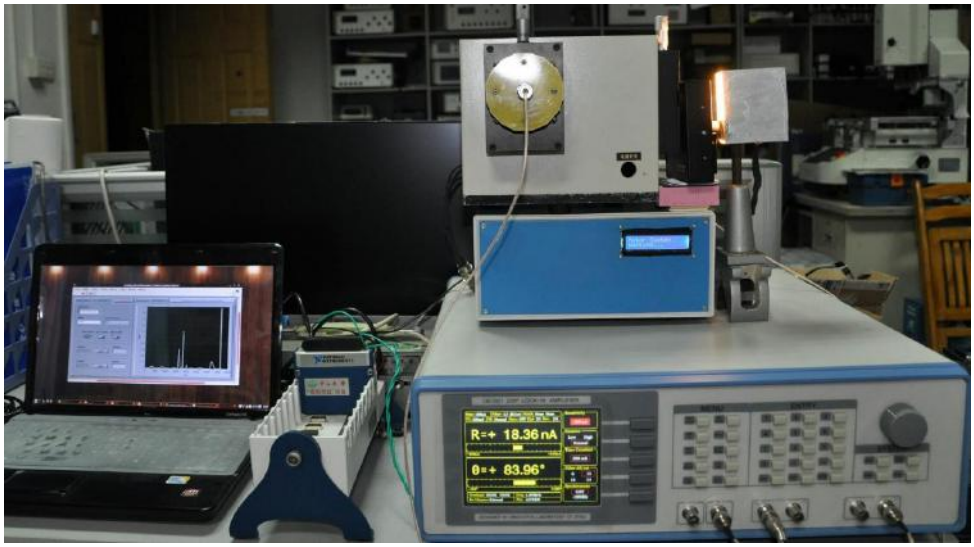


图85. 光谱测量平台实物连接图

4. 开始光谱测量实验，同时利用数据采集平台采集光谱数据，可以得到如下光谱曲线图 86（未定标）：

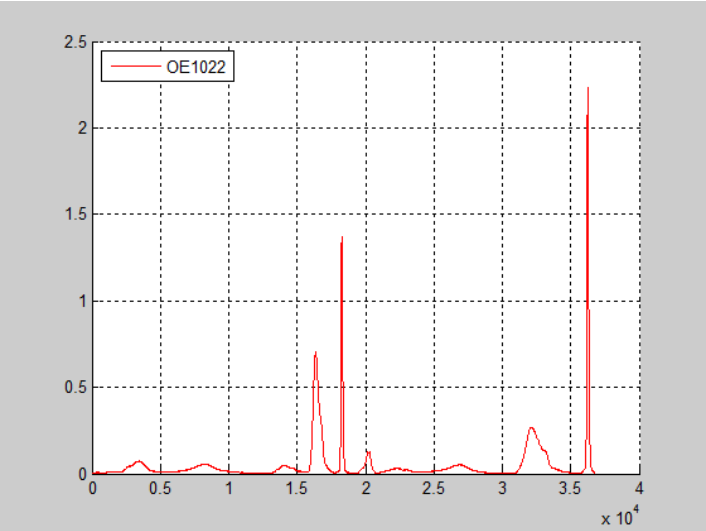


图86. OE2011/OE2021 测得的光谱曲线图

5. 将 OE2011/OE2021 替换为 SR830，在相同的参数设置下进行同样的光谱测量实验，得到的光谱曲线对照图 87 如下：

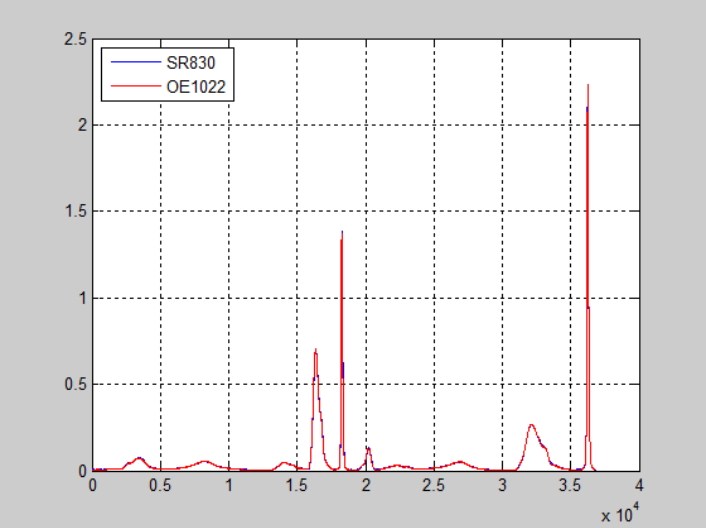


图87. 两台锁放测得的光谱曲线对照图

观察波形图可得，两条曲线基本重合。

8.5 串口通讯

本实例将演示 OE2011/OE2021 远程控制串口/USB2.0 环境搭建以及调试操作，你需要准备一条 USB2.0 TypeB 线，或者 USB 转 RS232 公头连接线，步骤如下：

1. 请用 USB 线连接 OE2011/OE2021 的 USB 插口跟电脑上的任一 USB 插口。
2. 电脑会自动识别到 USB 设备，然后提示安装驱动程序。
3. 打开 U 盘中 Uart_Assistant 文件夹，双击 UartAssist.exe 文件，弹出软件界面如图 88：

图88. 打开的软件界面

该串口调试软件包含了通讯设置，接收区设置，发送区设置，接收区，以及发送区。

OE2011/OE2021 串口默认波特率为 921600，校验位无，数据位 8 位，停止位 1 位（OE2011/OE2021 的波特率及校验位等可通过前面板子菜单上的 RS232 菜单选项来设置）。

由于 USB2.0 驱动是虚拟串口，因此跟 RS232 串口一样，都需要选择电脑为 OE2011/OE2021 自动分配的 COM 口，COM 端口编号可通过设备管理器中的端口（COM 和 LPT）选项来查看（计算机右键->属性->设备管理器->端口），如图 89 所示：

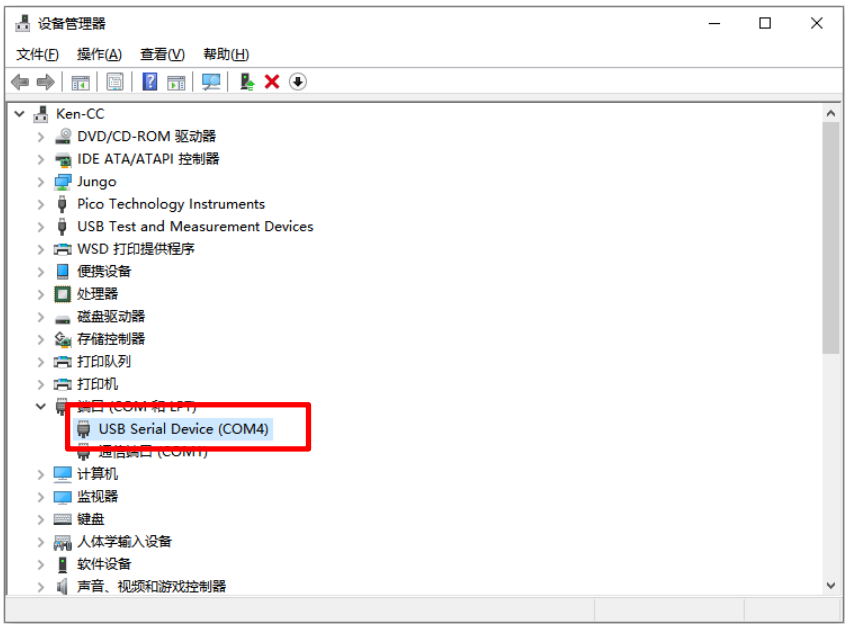


图89. 端口号的查看

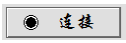
当配置好了端口号、波特率、校验位、数据位、停止位之后，如果连接按钮左边小圆圈为黑色熄灭状态（  ），需要点击一次改变按钮状态显示为红色点亮状态（ ），如果按钮为红色点亮状态就表明电脑跟当前串口号设备已连接成功，若多次点击连接不成功，请检查端口号是否选择合适，然后再尝试连接。连接成功如图 90 所示：

图90. 连接成功的状态

4. 完成以上操作之后，即可向 OE2011/OE2021 发送指令来进行通讯：

OE2011/OE2021 指令要求格式是四个大写字母助记符后加选项参数，例如指令“ISRC 0;”或“*IDN?;+回车符（0D）”，连续多条的指令可以用“;”号分隔开，指令结尾一定要附加上“;”号或回车符（十六进制数 0D），更多详细指令请查看远程编程章节的介绍。

发送指令时首先在发送区输入指令，然后输入“;”号，最后点击发送按钮，指令就会发送出去。如图 91 所示：

图91. ASCII 码形式发送和接收指令

同时的，串口调试助手可配置自动添加发送回车符 0X0D。勾选发送区设置的“自动发送附加位”选项,在弹出的附加位设置窗口选择固定位，附加值设置为十六进制值”0D”即可。配置如图 92 所示：

图92. 附加位的设置

多个指令的发送需要添加“；”号来分隔开，例如发送指令“IGND1;IGND?;OUTP?2;SENS?0;”效果如图 93 所示：

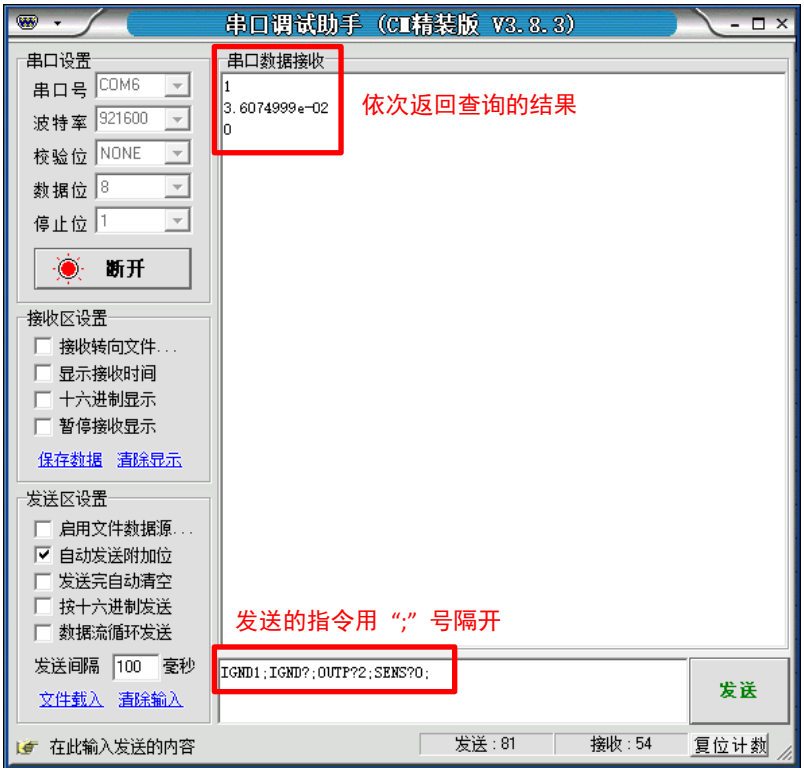


图93. 多重指令的执行

连续读取 OE2011/OE2021 的 X、Y、R 和 θ 值，可以设置串口调试助手软件的间隔发送，配置如图 94、图 95 所示：

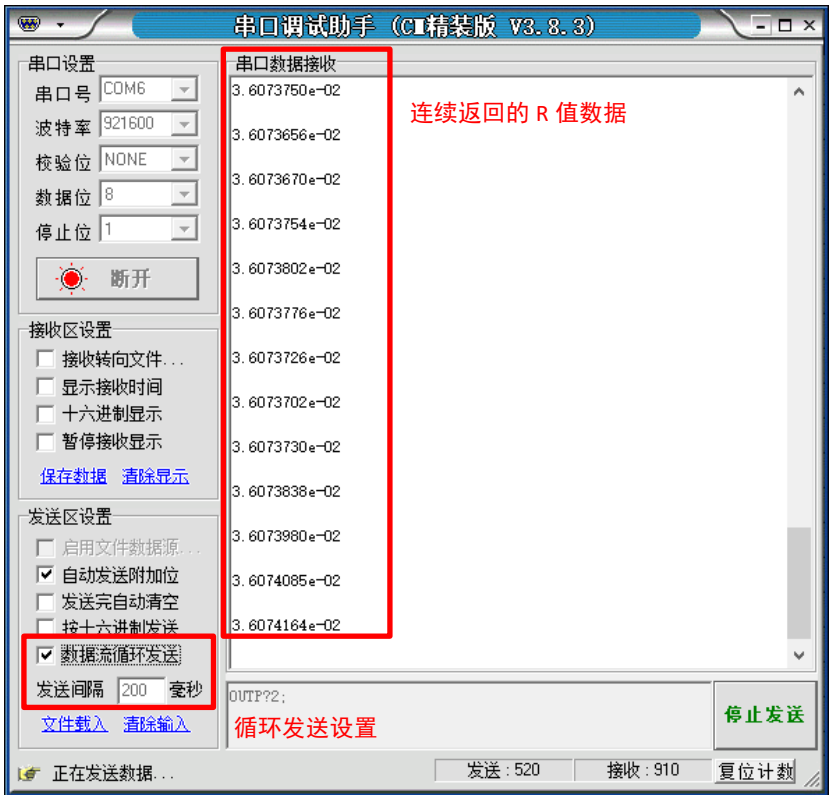


图94. 连续读取单个 R 值

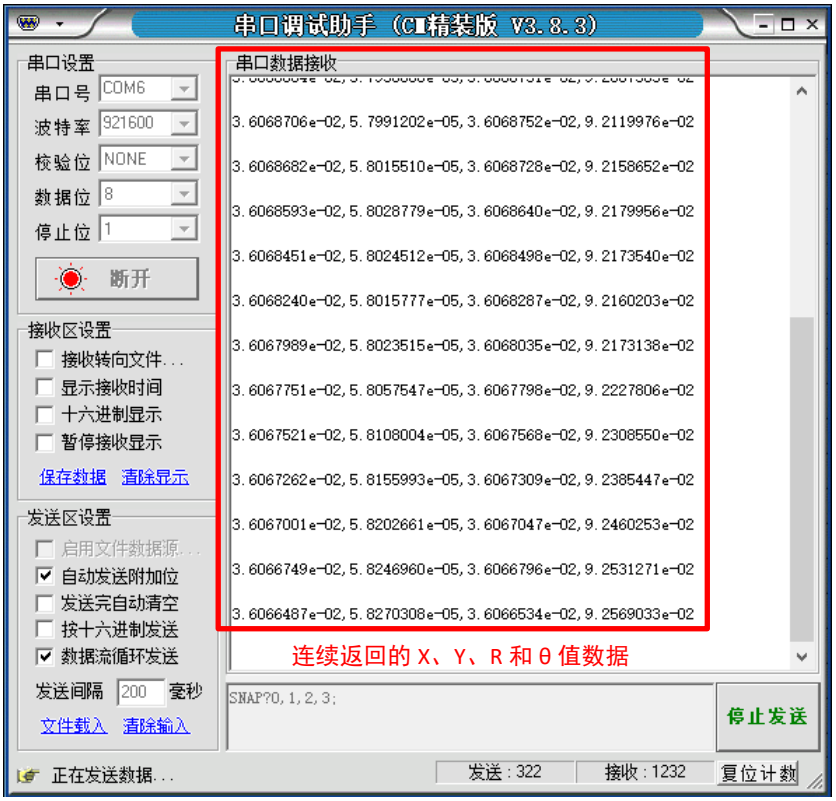


图95. 连续读取 X、Y、R、θ 值

通过串口调试助手远程控制发送指令设置 OE2011/OE2021 内部参数时，会同时更新 LCD 显示屏上状态的显示。例如 OE2011/OE2021 当前状态栏的<Input Range>值为<5 V>，对应指令标识号为 IRNG 0。当发送了指令“IRNG 1”之后，OE2011/OE2021 状态栏<Input Range>值会改变为指令标识码 1 所对应的值为<1 V>。

其他同类型的串口调试工具同样可以实现远程调试，操作步骤相似。