OE2011
DSP Lock-In Amplifier
用户使用手册

Copyright® 2024-2026 by SSI.
All Rights Reserved.

Revision 1.1.3, 2026-11-05

目录

第 1 章 技术参数 8
1.1 信号通道 8
1.2 参考通道 8
1.3 解调器 9
1.4 内部振荡器与输出 9
1.5 显示 9
1.6 辅助输入输出 10
1.7 通讯接口 10
1.8 其他 10
第 2 章 锁相放大器基础 12
2.1 锁相放大器介绍 12
2.2 OE2011 功能原理图 14
2.3 参考通道 15
2.4 相敏检波器 15
2.5 滤波器、时间常数和直流增益 16
2.6 动态储备 19
2.7 信号输入放大和滤波 19
2.8 输入端连接 21
2.9 固有噪声 22
2.10 外部噪声源 24
2.11 噪声测量 26
2.12 通道输出和增益（CHOUT/AUXOUT） 26
2.13 辅助模拟输入（AUX IN） 27
2.14 信号发生器 27
2.15 多谐波测量 27
第 3 章 界面介绍 29
3.1 前面板 29
3.1.1. 显示屏 29
3.1.2. 软键 29
3.1.3. 旋钮 29
3.1.4. 键盘 29
3.1.5. BNC 连接器 30
3.2 后面板 30
3.2.1. 电源接口 30
3.2.2. USB2.0 30
3.2.3. RS232 31

3.2.4. GPIB 31
3.2.5. 以太网接口 31
3.2.6. AUX IN 31
3.2.7. AUX OUT/CH OUT 31
3.2.8. TTL OUT 31
3.2.9. CLK IN & OUT 31
3.2.10. TRIG IN & OUT 31
3.2.11. MONITOR OUT 31
3.3 主界面 32
3.3.1. 状态栏 32
3.3.2. 数据栏 33
3.3.3. 监测栏 33
3.3.4. 功能栏 34
第 4 章 上位机介绍 35
4.1 连接上位机 35
4.1.1. 获取仪器内置资料 35
4.1.2. 安装或更新 USB 驱动 35
4.1.3. 运行上位机软件 38
4.2 上位机概述 39
4.3 上位机功能介绍 40
4.3.1. 功能菜单 40
4.3.2. Lock_in 选项卡 41
4.3.3. Plotter 选项卡 42
4.3.4. Scope 选项卡 42
4.3.5. FFT 选项卡 42
4.3.6. Sweeper 选项卡 43
4.3.7. PID 选项卡 43
4.4 软件使用范例 44
第 5 章 界面与上位机功能 50
5.1 [SIGNAL INPUT] 子菜单 50
5.1.1. 前面板界面配置 50
5.1.2. 上位机配置 51
5.2 [OSC REF] 子菜单 52
5.2.1. 前面板界面配置 52
5.2.2. 上位机配置 54
5.3 [DEMOD FILTER] 子菜单 55
5.3.1. 前面板界面配置 55

5.3.2. 上位机配置 57
5.4 [DEMOD REF] 子菜单 57
5.4.1. 前面板界面配置 57
5.4.2. 上位机配置 61
5.5 [DISPLAY] 子菜单 62
5.5.1. 前面板界面配置 62
5.5.2. 上位机配置 64
5.6 [SIGNAL OUTPUT] 子菜单 65
5.6.1. 前面板界面配置 65
5.6.2. 上位机配置 66
5.7 [AUTO SET] 子菜单 67
5.7.1. 前面板界面配置 67
5.7.2. 上位机配置 68
5.8 [CHANNEL OUTPUT] 与 [AUX OUTPUT] 子菜单 69
5.8.1. 前面板界面配置 69
5.8.2. 上位机配置 72
5.9 [SYSTEM] 子菜单 72
5.9.1. 前面板界面配置 72
5.9.2. 上位机配置 79
5.10 上位机数据保存 80
5.10.1. 全局数据保存 80
5.10.2. Plotter 波形图数据保存 81
5.10.3. Scope 波形图数据保存 82
5.10.4. Sweeper 波形图数据保存 83
第 6 章 远程编程 85
6.1 OE2011 命令语法 85
6.2 详细的命令列表 86
6.2.1. 输入通道配置指令 87
6.2.2. 振荡器配置指令 87
6.2.3. 解调器配置指令 89
6.2.4. 信号输出通道配置指令 92
6.2.5. 通道输出指令 94
6.2.6. 自动设置指令 98
6.2.7. 保存读取设置指令 99
6.2.8. 复位与 IDN 指令 99
6.2.9. 数据和状态读取指令 100
6.2.10. 时钟与触发信号配置指令 103

第 7 章 性能测试 104
7.1 启动测试 106
7.2 直流偏置 106
7.3 共模抑制 106
7.4 幅值精度与平坦度 107
7.5 幅值线性度 108
7.6 频率精度 109
7.7 Sine Out 幅值相位的精度与平坦度 109
7.8 直流输出和输入 110
7.9 输入噪声 111
7.10 性能测试记录表 113
第 8 章 操作实例 117
8.1 基本信号测量 117
8.2 谐波测量 121
8.3 AM 解调测量 124
8.4 串口通讯 125

修订历史

版本 Revision 1.1.3 更新，2026-11-05

更新上位机软件获取及启动说明，新增 Windows 7/8/8.1 USB 驱动安装步骤和设备管理器端口识别示例。

Revision 1.1.2, 2026-10-13

修正 SYNC 同步滤波器生效条件及多项指令说明，包括 RSLP、AMSR、FMSR、PMSR、COUT/FOUT、AXOS 和 *PLL? 等；仅修正指令描述，对应指令参数保持不变。

Revision 1.1.1, 2026-05-14

增加电压与电流挡位的量程/增益关系表。具体参考第 2.7 章节。

Revision 1.1.0, 2026-03-06

1. 调整文档部分格式。重新拆分 OE2011 和 OE2021 的用户手册。上位机平台升级为 SSI Lucid Suite，更新上位机操作说明。

2. 电流噪声 1kHz 时的典型值改为 15fA/$\sqrt{\text{Hz}}$。

3. 远程通讯指令/编程部分修改（具体参考第 6 章编程说明）：

1) 所有通讯指令中描述通道数的参数的起始值从 0 改为 1。

2) AUXOUT 增加 X、Y、R 等参数的输出类型选择，增加相关的 AXOS、AXDC、AXSN、AXOF、AXEX 指令。

3) Equation 功能升级为 FreqComb 功能，对应的指令从 DARF、DEQU、DEAF 修改为 DMFR、FCMB、FCMF，对应参数修改。

4) Sineout 调制模式的内部频率指令从 MARF 修改为 SMFR，对应参数不变。

Revision 1.0.0, 2024-10-29

第一版用户使用手册。

第 1 章 技术参数

1.1 信号通道

- 通道数 1
- 输入模式
  - 电压挡位 单端 (IN+) 或差分 (DIFF) 电压输入
  - 电流挡位 单端信号 (跨阻输入)
- 满量程灵敏度
  - 电压挡位 1 nV 至 5 V_{rms}
  - 电流挡位 1 pA 至 5 mA
- 电流跨阻增益电阻 1 kΩ, 1 MΩ, 100 MΩ 三个挡位
- 输入阻抗
  - 电压挡位 10 MΩ || 25 pF
  - 电流挡位 100 Ω 或 1 kΩ || 10 pF
- 输入耦合 交流耦合（截止频率 0.16 Hz），直流耦合
- 输入屏蔽接地 BNC (IN+, IN-) 屏蔽层可直接接地，或选择 10 kΩ 电阻接入浮地
- 共模抑制比 >110 dB (@ 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
  - 1 kHz 时 3.3 nV/$\sqrt{Hz}$ (Typ)
  - 10 kHz 时 3.0 nV/$\sqrt{Hz}$ (Typ)
  - 100 kHz 时 2.5 nV/$\sqrt{Hz}$ (Typ)
  - 1 MHz 时 2.5 nV/$\sqrt{Hz}$ (Typ)
- 电流噪声
  - 97 Hz 时 20 fA/$\sqrt{Hz}$ (Typ)
  - 1 kHz 时 15 fA/$\sqrt{Hz}$ (Typ)

1.2 参考通道

- 输入
  - 通道数 2
  - 频率范围 10 μHz 至 250 kHz
  - 支持输入波形 方波或正弦波
  - 输入阻抗 1 MΩ
  - 方波参考电平 −0.1 V < V_L < 0.5 V，3 V < V_H < 5 V
  - 正弦参考信号 频率 > 1 Hz
    300 mV < V_{PP} < 10 V
- 相位
  - 分辨率 1 μ°
  - 相位误差 典型 0.5°，最大 2°
  - 温漂 < 200 ppm/°C
- 谐波检测 1~10 000 (nF < 250 kHz)
- 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/°C
- 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 解调参考频率低于 250 kHz 时，开启即可生效

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/°C
  - 老化率 < 1 ppm/year
  - 相位噪声 −145 dBc/Hz (@ 1 kHz)
- 输出频率
  - 范围 DC 至 250 kHz
  - 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)
- 正弦输出
  - 通道数 1
  - 幅值 0.1 μV_{rms} 至 5 V_{rms}
  - 精度 典型 0.5% (f < 100 kHz)，最大 2% ±1 μV_{rms}
  - 分辨率 0.1 μV_{rms}
  - 驱动能力 ±80 mA max
  - 温度稳定性 < 200 ppm/°C
  - 输出阻抗 50 Ω
- 内部直流偏置 -5V_{DC} 至 +5V_{DC} 可调，分辨率 1 mV
- 同步输出 3.3 V 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
  - 屏幕尺寸 5.6 英寸，640×480 的 TFT-LCD
  - 屏幕格式 双栏动态图和全数据显示
  - 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，0.3 mV 分辨率，0.5% + 10 mV 精度
  - 阻抗 1 MΩ
  - 采样率 125 kSPS
- AUX Outputs
  - 功能 4 通道输出
  - 幅值 ±10 V，0.3 mV 分辨率，0.5% + 10 mV 精度
  - 驱动电流 ±30 mA max
  - 输出速率 500 kSPS
- CH Outputs
  - 功能 2 通道输出
  - 幅值 ±10 V，0.3 mV 分辨率，0.5% + 10 mV 精度
  - 驱动电流 ±30 mA max
  - 输出速率 1 MSPS
- Clock Input
  - 功能 外部 10 MHz 时钟输入接口
  - 电平 3.3 V TTL/CMOS
- Clock Output
  - 功能 10 MHz 时钟输出接口
  - 电平 3.3 V TTL/CMOS
- Trigger Input
  - 功能 锁相放大器的触发信号输入接口
  - 电平 3.3 V TTL/CMOS
- Trigger Output
  - 功能 提供给其他设备的触发信号输出接口
  - 电平 3.3 V TTL/CMOS
- Monitor Output
  - 功能 模拟链路中 ADC 前镜像信号输出
  - 驱动电流 ±40 mA max

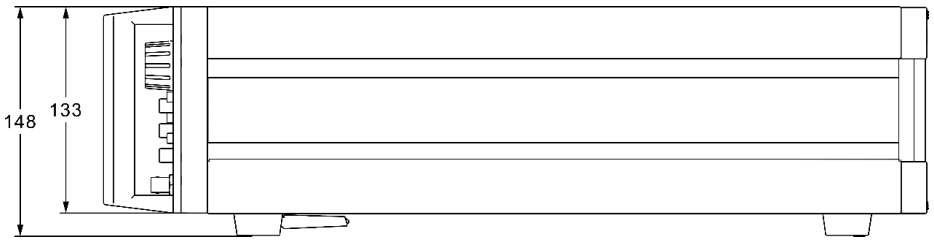
1.7 通讯接口

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

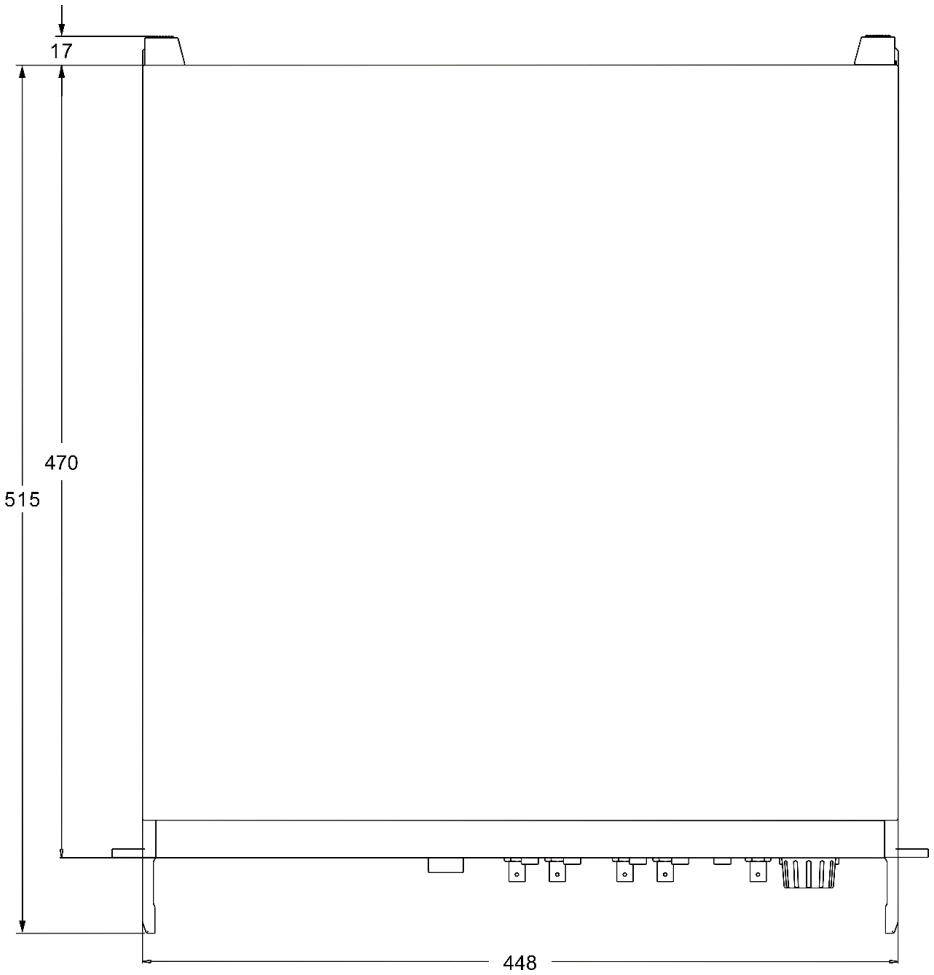
1.8 其他

- 电源要求
  - 电压 100~240 V AC
  - 频率 50 Hz / 60 Hz
  - 功率 典型 50 W，最大不超过 70 W

- 电源噪声抑制 70 dB @ 1 MHz
- 接地插座 香蕉插座 / M6 螺纹柱
- 重量 8 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（侧视图）



- 产品尺寸图（俯视图）



第 2 章 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。

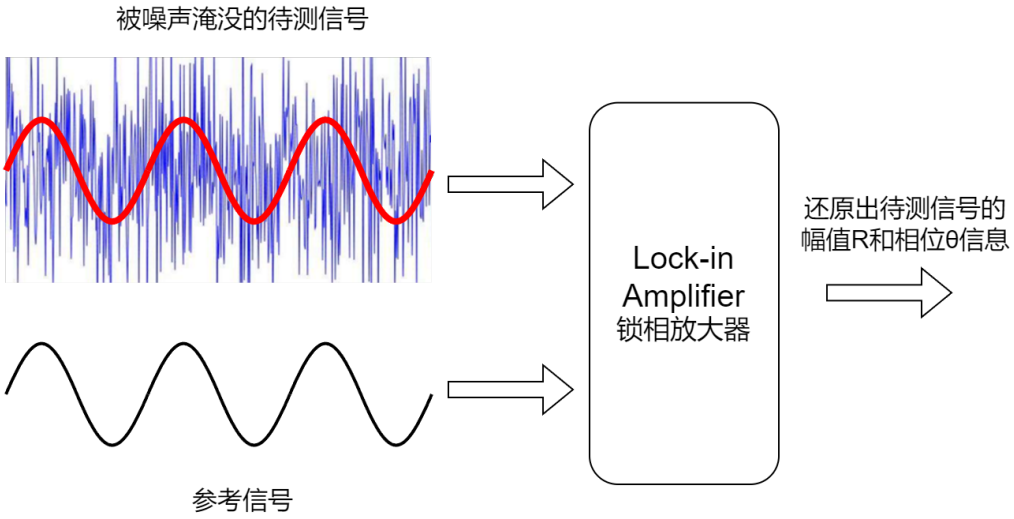


图 1. 锁相放大器示意图

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，任何放大操作都会导致信号的信噪比下降。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。而滤波器中最优选择是带通滤波器，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乘法器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。

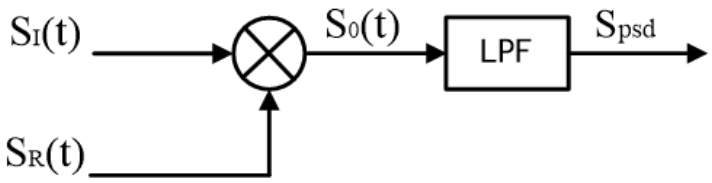


图 2. 相敏检测示意图

$S_I(t)$ 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。

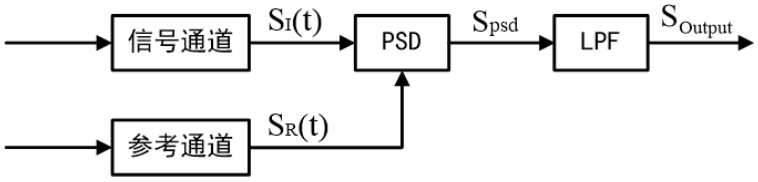


图 3. 单相型锁相放大器结构图

从信号通道进入 PSD 模块的信号可定义为：

$$S_I(t) = A_I \sin(\omega t + \varphi) + B(t)$$

其中 ω 是待测信号的频率，$A_I \sin(\omega t + \varphi)$ 是待测信号，$B(t)$ 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：

$$\begin{aligned} S_{psd} &= S_I(t) S_R(t) = A_I A_R \sin(\omega t + \varphi) \sin(\omega t + \delta) + B(t) A_R \sin(\omega t + \delta) \\ &= \frac{1}{2} A_I A_R \cos(\varphi - \delta) - \frac{1}{2} A_I A_R \cos(2\omega t + \varphi + \delta) + B(t) A_R \sin(\omega t + \delta) \end{aligned}$$

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：

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

从频域上观察锁相放大器的频谱搬移过程如下图所示：

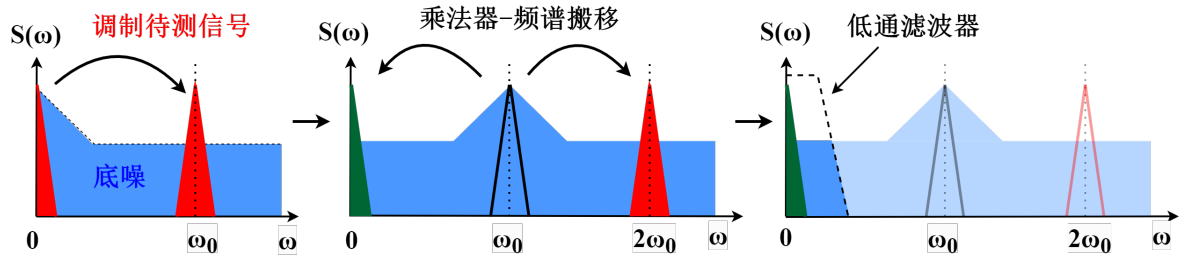


图 4. 锁相放大器频谱搬移过程

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。

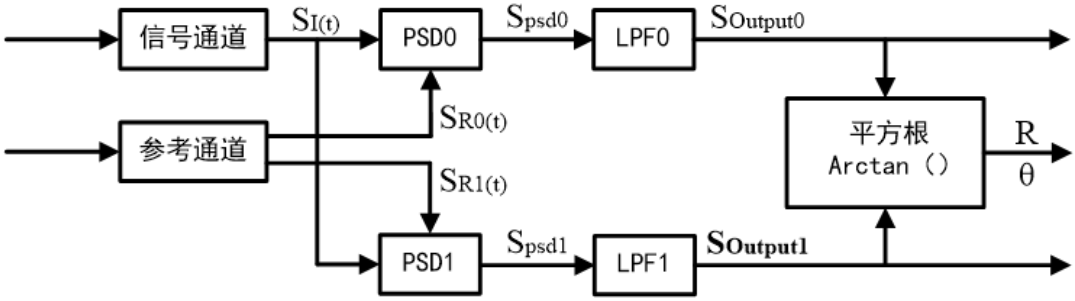


图 5. 双相锁相放大器结构图

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：$S_{Output0} = \frac{1}{2} A_I A_R \cos\theta$，$S_{Output1} = \frac{1}{2} A_I A_R \sin\theta$。

定义 $X = A_I \cos\theta$，$Y = A_I \sin\theta$，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 功能原理图

数字锁相放大器 OE2011 的原理框图如下所示：

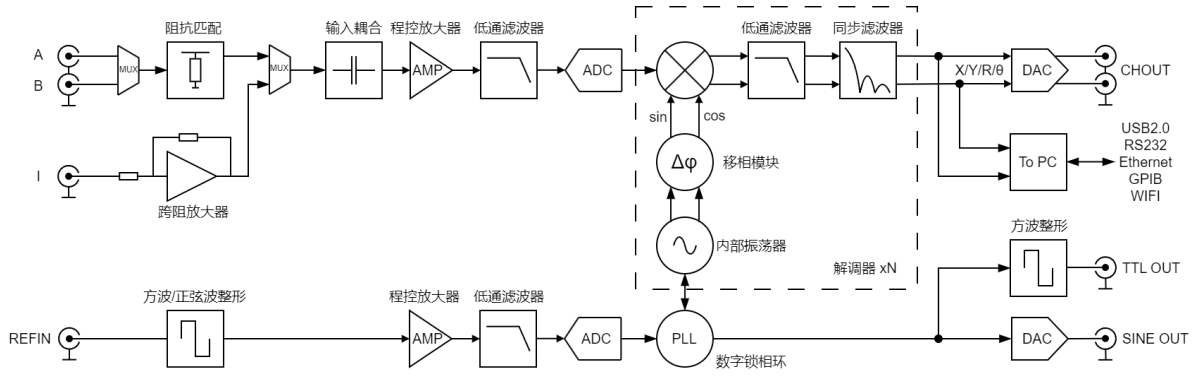


图 6. OE2011 原理框图

总体来看，OE2011 功能模块总体分为信号调理通道、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 SSI Lucid Suite 软件进行观察。

OE2011 具有 2 个数字锁相环，可同时锁定 2 个参考/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 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 1MΩ。OE2011 有 2 路参考信号输入通道 REF IN，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 >3 V，低电平 <0.5 V；正弦参考为交流耦合，正弦信号幅值大于 0.3 V_{pp} 有效。**但当频率低于 1Hz 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 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 μHz 至 250 kHz 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 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 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 64 bit。

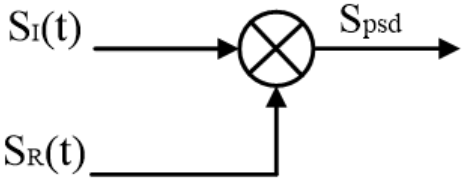


图 7. 相干检测核心部分

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 24 bit 位宽的数字信号，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 的动态储备能达到 120 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。

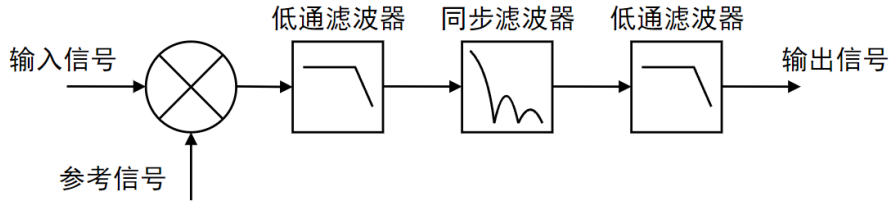


图 8. 相敏检波器的滤波器结构

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（简称 TC）的计算公式为：

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

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：

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：

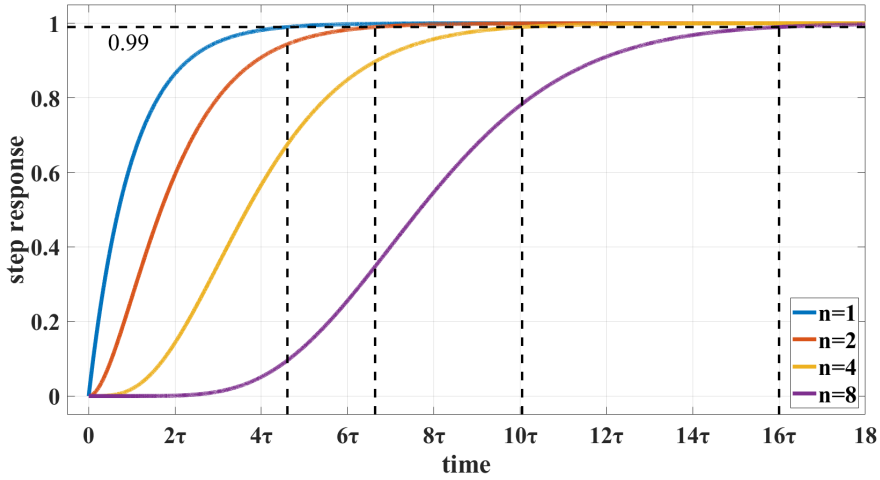


图 9. 低通滤波器的阶跃响应

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 ÷TC	4.6×TC
2	12 dB/oct	0.125 ÷TC	6.6×TC
3	18 dB/oct	0.09375 ÷TC	8.4×TC
4	24 dB/oct	0.07813 ÷TC	10.0×TC
5	30 dB/oct	0.06836 ÷TC	11.6×TC
6	36 dB/oct	0.06152 ÷TC	13.1 ×TC
7	42 dB/oct	0.0564 ÷TC	14.6×TC
8	48 dB/oct	0.05237 ÷TC	16.0×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 1 Hz 频率的波形，那么二倍频分量即为 2 Hz，即使是 10 秒时间常数的二阶 RC 滤波器，对于 2 Hz 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，效果等同于零点频率为参考频率的 Sinc 滤波器。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 中，当解调参考频率低于 250 kHz 时，开启同步滤波器即可生效。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 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 5 V，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 在动态储备能达到 130 dB 时仍能不受偏置影响的原因。

2.6 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 100 dB，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 dB，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 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 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。

2.7 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 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输入信号的信噪比。

输入噪声

假如放大器的输入噪声为 10 $nV_{rms}/\sqrt{Hz}$，增益为 1000 倍，那么将输出 10 $\mu V_{rms}/\sqrt{Hz}$ 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 $\mu V_{rms}/\sqrt{Hz}$ 噪声，其等效噪声带宽为 2.5 Hz，滤波器的输出电压噪声为 $10\,\mu V_{rms}/\sqrt{Hz} \times \sqrt{2.5\,Hz} = 15.8\,\mu V_{rms}$。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 1200 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 设定到 <1 mV> 量程（该挡位增益为 1200 倍），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。OE2011 的输入噪声约为 2.5 $nV_{rms}/\sqrt{Hz}$，在这个设置下，滤波器的输出总噪声为 4.7 μV_{rms}，等效到输入端的噪声为 3.9 nV_{rms}，噪声与总量程占比为 3.9 ppm（即 3.9 nV/1 mV）。

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 $0.13\times\sqrt{R}$，以 100 Ω 电阻为例，常温下其约翰逊噪声为 1.3 $nV_{rms}/\sqrt{Hz}$。而一个阻抗为 10 kΩ 的信号源的约翰逊噪声 13 $nV_{rms}/\sqrt{Hz}$ 都大于 OE2011 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 的输入噪声叠加起来，总噪声大小为 $\sqrt{2.5^2+13^2}=13.2\ nV_{rms}/\sqrt{Hz}$。可以发现，当输入噪声较大时（比仪器自身输入噪声大一个数量级以上），OE2011 的输入噪声对系统总噪声的影响可以忽略不计。

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，才能完整地保留原始信号中的信息。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 的 A/D 转换器采样频率是 4 MHz，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 250 kHz 的高频部分。低通滤波器具有平坦的通带 (0~250 kHz)，在这个频率范围内的信号不会受影响。高于 250 kHz 的高频部分信号会被逐渐衰减，从 250 kHz 至 3.75 MHz 是过渡阶段，对高于 3.75 MHz 频率的信号和噪声产生 100 dB 以上的衰减。

输入阻抗

OE2011 的输入阻抗为 10 MΩ。如果需要更高的输入阻抗，可以使用 OE2011 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。

电流输入

OE2011 可以直接测量电流信号。用户只需将电流信号接入 OE2011 的电流输入端口，对应切换至电流挡位，即可进行测量。电流信号的测量原理是通过一个精密的跨阻放大电路将电流信号转换为电压信号，再由锁相放大器进行测量。电流输入的增益设置与电压输入不同，用户可以根据实际需求选择合适的量程挡位，以确保测量结果的准确性和稳定性。

量程挡位与增益设置

OE2011 的电压和电流模式各有 7 档输入量程，不同的输入量程对应不同的增益设置。用户可

以根据待测信号的幅值选择合适的量程挡位，以确保信号能够被有效放大到模数转换器的输入范围内，同时避免过载或动态储备过大的情况。

各电压量程挡位对应的增益倍数设置如表 2 所示：

表 2. 电压量程挡位对应的增益倍数设置

电压量程	增益倍数
5 V	0.2
1 V	0.8
200 mV	8
50 mV	32
10 mV	120
2 mV	480
1 mV	1200

各电流量程挡位对应的增益倍数、跨阻电阻、-3dB 带宽设置如表 3 所示：

表 3. 电流量程挡位设置

电流量程	电流转电压的总增益	跨阻电阻值	DC 输入阻抗	-3dB 带宽
5 mA	2×10^2 V/A	1 kΩ	100 Ω	>1.5 MHz
500 µA	2×10^3 V/A	1 kΩ	100 Ω	>1.5 MHz
50 µA	2×10^4 V/A	1 kΩ	100 Ω	>1.5 MHz
5 µA	2×10^5 V/A	1 MΩ	100 Ω	80 kHz
500 nA	2×10^6 V/A	1 MΩ	100 Ω	80 kHz
50 nA	2×10^7 V/A	100 MΩ	1 kΩ	800 Hz
5 nA	2×10^8 V/A	100 MΩ	1 kΩ	800 Hz

2.8 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（IN+）

单端连接模式中，使用 IN+ 输入端。锁相放大器检测 IN+ 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 里，有浮地（Float）和接地（Ground）两种电阻模式选择，浮地采用 10 kΩ 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（DIFF）

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（IN+、IN-）中。这个模式下检测 IN+ 和 IN-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 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（−3 dB 频率是 0.16 Hz）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 10 Hz（保证通带平坦度）的情况下使用。对于低于 10 Hz 频率的信号，应该使用直流耦合模式。直流耦合模式对输入信号没有任何影响。

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 10 Hz 时，建议使用交流耦合模式。

2.9 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，$k = 1.38 \times 10^{-23}$ 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：$^0K=^0C+273.15$)，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 μA 的电流在 10 kHz 范围内测量值的均方电流波动为 57 pA，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

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

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，因此又称为低频噪声。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，然而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，其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。

2.10 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 2π 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 50 Hz 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，$k = 1.38 \times 10^{-23}$ 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+273.15)，其中 q 为电子电荷 (1.60×10^{-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。

2.11 噪声测量

OE2011 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 的上位机软件带有 Sweeper 参数扫描仪功能，可使用该功能进行噪声谱的测量。

OE2011 采用频带内总噪声积分法来测量参考频率附近的噪声。首先，在设定时间内采集解调器输出的 X 分量数据，并计算其均方根值（RMS），该值代表了参考频率附近特定带宽内的总噪声幅度。随后，需对该总噪声值进行归一化处理，以消除数字滤波器带宽的影响。具体方法是将上述计算得到的均方根值除以数字滤波器的等效噪声带宽（ENBW）的平方根（即 $\sqrt{\mathrm{ENBW}}$）。经上述处理后得到的数值即为噪声谱密度，其单位是 $\mathrm{V}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$。关于等效噪声带宽的具体计算方法及参数选择，请参阅本手册 2.5 章节的表 1。

2.12 通道输出和增益（CHOUT/AUXOUT）

OE2011 在后面板拥有 CHOUT1 ~ CHOUT2 和 AUXOUT1 ~ AUXOUT4 合计六个辅助输出通道。

CHOUT1 至 CHOUT2 的输出与显示

CHOUT1 至 CHOUT2 的输出范围为 −10 V 到 10 V，刷新率为 1 MSPS，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 还能通过前面板的显示屏显示 CHOUT1 至 CHOUT2 的数据源，其中包括被测信号的 X 值、Y 值、R 值、θ 值等数据。

AUXOUT1 至 AUXOUT4 的输出与显示

AUXOUT1 至 AUXOUT4 的输出范围为 −10 V 到 10 V，刷新率为 500 kSPS，数模转换器位数为 16 bit。此接口功能与 CHOUT1 至 CHOUT2 类似，用户可以选择输出被测信号的 X 值、Y 值、R 值、θ 值等数据。

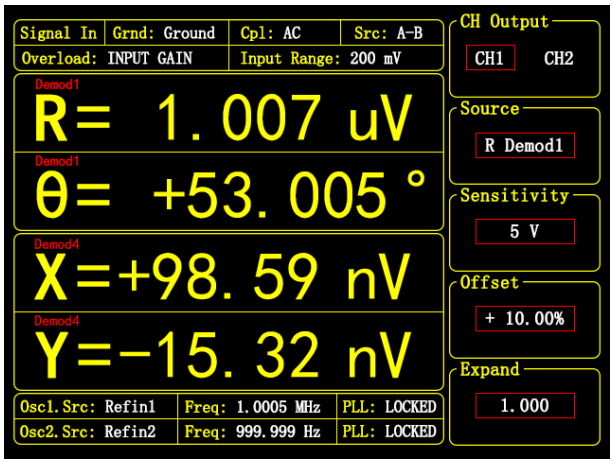


图 10. OE2011 输出设置界面

X，Y 和 R 的输出偏移与增益

OE2011 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 1 V 提升至 10 V。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 能够提供增益系数为 +0.001~+10 000 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~+10 000 之间进行设置，可通过数字键盘直接输入，最小步进为 0.001。例如：

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

2.13 辅助模拟输入（AUX IN）

OE2011 包含了四路 16 位的高精度辅助 AUX IN 输入通道，输入电压范围为 ±10 V，最小分辨率达 0.3 mV，采样率为 125 kSPS。这四路 ADC 提供输入信号的钳位保护和内部差分放大功能，输入阻抗达 1 MΩ，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 PID 运算和传送给控制计算机。

AUX IN 接口采用标准 BNC 接头，集成在 OE2011 后面板。AUX IN 数值显示可以在 [DISPLAY] 子菜单中进行设置。

2.14 信号发生器

OE2011 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 ~ 5 V_{rms}，输出阻抗为 50 Ω，驱动电流能力达 80 mA。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 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 内部可叠加 ±5 V DC 范围的直流偏置电压。

OE2011 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 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 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 还增加了任意频率解调功能以及频率合成解调功能。

第 3 章 界面介绍

3.1 前面板



图 11. OE2011 前面板

3.1.1. 显示屏

OE2011 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，支持双栏动态图和全数据显示。此外，双栏动态图显示支持数字、条形图显示，全数据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 Input Range 范围设置，对频率值的单一个位进行修改等。

3.1.5. BNC 连接器

前面板拥有 5 个 BNC 连接器，从左往右分别是 SINE OUT, REF IN 1, REF IN 2, SIGNAL IN-, SIGNAL IN+/I。

SINE OUT

信号发生器提供最大 5 V_{rms} 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，信号发生器的信源通过锁相环与参考信号进行锁相同步。

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 50 Ω 或 1 MΩ。正弦波输入为交流耦合，支持 >1 Hz 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- / IN+ / I

信号输入可以选择单端电压输入 IN+，差分电压输入 DIFF（IN+ 和 IN-差值）以及单端电流输入 I。其中 SIGNAL IN+ 和 I 接口共用同一个 BNC 接口。当测量电压信号时，IN-和 IN+ 两个接口输入阻抗均为 10 MΩ||25 pF。当测量电流信号时，I 接口输入阻抗为 100 Ω or 1 kΩ。

3.2 后面板

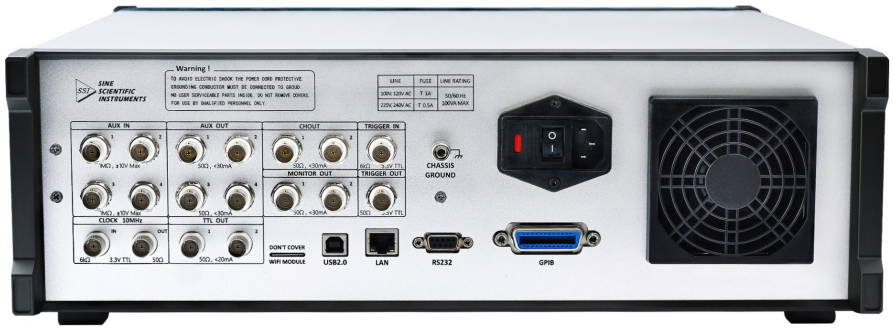


图 12. 后面板

OE2011 后面板如图 12 所示，包括散热风扇，电源接口，接地端子，USB2.0 接口，RS-232 母接口，以太网接口，GPIB 接口，Digital-IO 接口以及扩展辅助功能接口。其中，扩展辅助功能接口包括 AUX IN/OUT、CH OUT、CLK IN/OUT、TRIGGER IN/OUT、和 MONITOR OUT。

3.2.1. 电源接口

电源接口用于整台仪器供电输入，接受 100~240 V、50 Hz/60 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 锁相放大器与 PC 机进行通信。可以通过 PC 机对 OE2011 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 与其他设备进行通讯。

3.2.4. GPIB

标准 GPIB 母接口，符合 IEEE-488.2 标准，可允许 OE2011 与其他设备进行通讯。

3.2.5. 以太网接口

以太网接口通讯数据高达 1000 Mbit/s，可跟 PC 机进行快速通讯。

3.2.6. AUX IN

四路 AUX IN 辅助输入接口，输入范围 ±10 V，最小分辨率为 0.3 mV。

3.2.7. AUX OUT/CH OUT

四路 AUX OUT 两路 CH OUT 辅助输出接口，输出范围 ±10 V，最小分辨率为 0.3 mV。

3.2.8. TTL OUT

TTL OUT 输出接口，输出与 Sineout 信号同频同相的 3.3 V TTL 方波信号。

3.2.9. CLK IN & OUT

CLK IN 是外部时钟输入接口，允许 10 MHz、3.3 V 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 性能下降。

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

3.2.10. TRIG IN & OUT

触发输入与输出接口用于依据外部基准信号采集待测信号，也可以用于多台 OE2011 之间的同步。

3.2.11. MONITOR OUT

MONITOR 提供了一个模拟放大、滤波之后的镜像信号，即 ADC 模数转换器采集的信号的镜像。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较小的信号。

3.3 主界面

OE2011 主界面中可以分为四个部分。

3.3.1. 状态栏

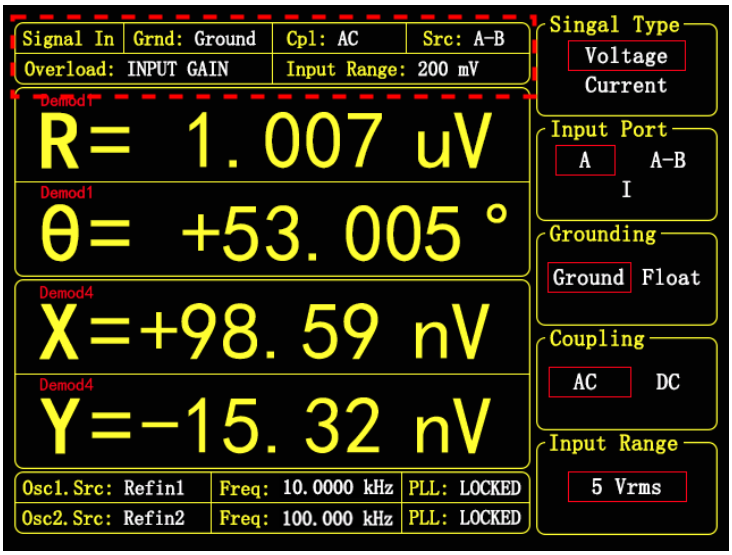


图 13. 主界面-状态栏 1

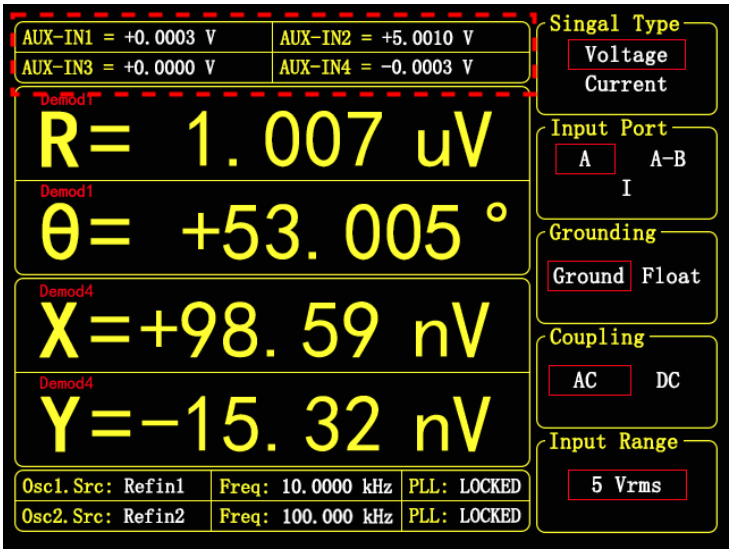


图 14. 主界面-状态栏 2

状态栏位置如图 13、图 14 红框区域所示，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>： IN+、IN-接口外壳屏蔽层接地方式。

<Coupling>： 输入耦合方式。

<Port>： 输入接口模式。

<Overload>： 提示输入过载、溢出的状态量，能够提示前级输入和增益倍数是否溢出。若未发生溢出，则显示：Overload: NONE NONE；若前级输入溢出（判断电压为 ±7 V，当输入电压超过 7 V 或者低于 −7 V 时（5 V_{rms} 对应的峰谷值电平）则会提示前级溢出），则显示Overload:

INPUT NONE；若增益倍数溢出，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，输入信号不能超过这个量程。

<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

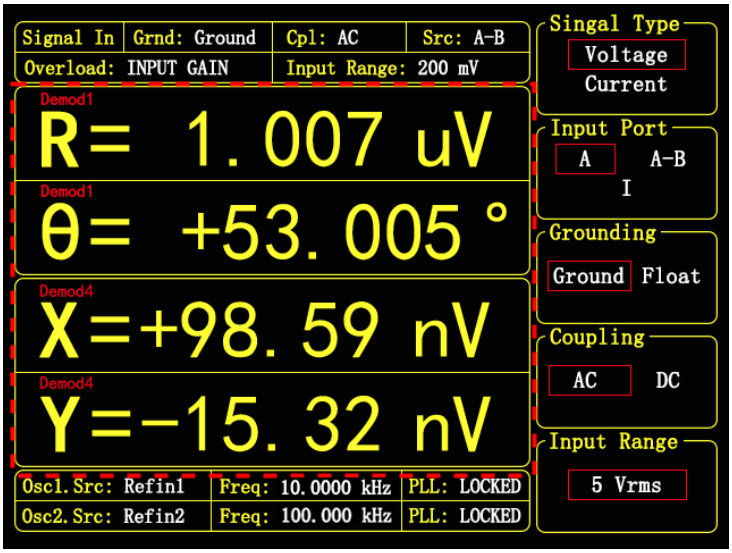


图 15. 主界面-数据栏

数据栏位置如图 15 红框区域所示，可在 [DISPLAY] 子菜单中选择显示 <X>、<Y>、<R>、<θ> 值，显示方式可选择四分栏动态图、全数据显示图。设置方式详见 [DISPLAY] 子菜单。

3.3.3. 监测栏

监测栏位置（图 16 红框区域）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。

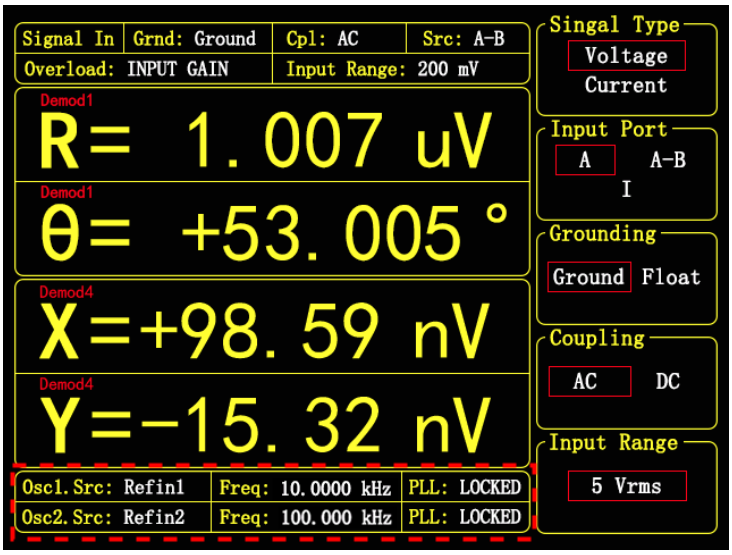


图 16. 主界面-监测栏

3.3.4. 功能栏

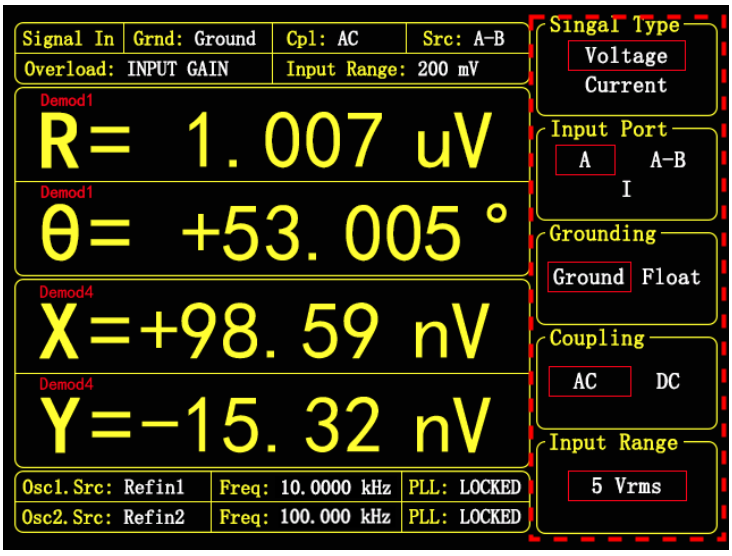


图 17. 主界面-功能栏

功能栏位置如图 17 红框区域所示，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，是控制仪器的主要方式。

第 4 章 上位机介绍

4.1 连接上位机

首次使用时，请先获取仪器内部存储空间中的软件及相关资料，按所用 Windows 系统完成 USB 驱动准备，再运行上位机软件并连接仪器。

4.1.1. 获取仪器内置资料

OE2011 仪器内部存储空间中已预存 SSI Lucid Suite 软件及相关资料。通过 USB 线将仪器连接至 PC 电脑后，电脑会自动弹出包含软件及相关资料的文件夹。也可在 Windows 系统中打开【此电脑】（或【我的电脑】），在“设备和驱动器”列表中找到仪器对应的存储设备，双击打开以获取软件及相关资料。请将软件复制到 PC 电脑后使用。

打开资料文件夹后，请先阅读 Readme.txt，了解软件目录、运行要求及注意事项。资料目录示例如图 18 所示，文件名称及版本以仪器内实际提供的内容为准。

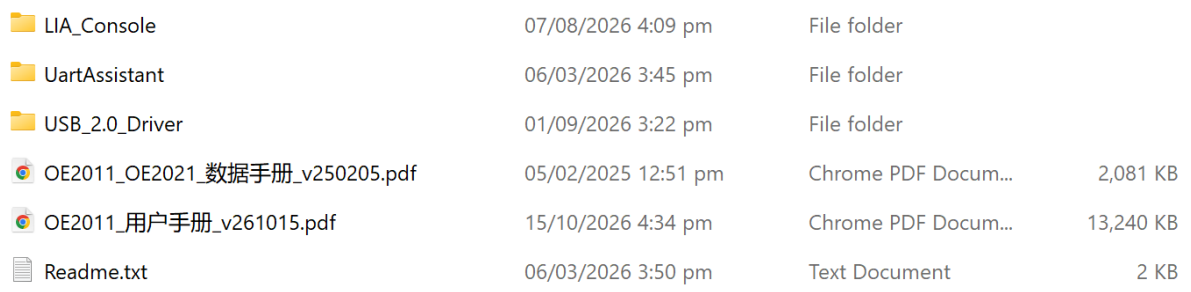


图 18. 仪器内置资料目录示例

- Readme.txt：首次使用说明。
- LIA_Console：上位机软件压缩包，需完整解压后使用。
- USB_2.0_Driver：USB 驱动程序，供需要手动安装驱动的电脑使用。
- UartAssistant：串口调试工具，正常运行上位机软件时无需打开。
- 数据手册与用户手册：用于了解仪器主要信息及查阅操作说明。

4.1.2. 安装或更新 USB 驱动

使用 USB 接口与仪器通信时，Windows 7/8/8.1 用户需安装相应的 USB 驱动程序；Windows 10/11 系统默认内置所需的 USB 驱动程序，无需额外安装。连接仪器后，打开 Windows 设备管理器，在“端口（COM 和 LPT）”中确认仪器对应的 COM 端口已被系统正确识别，即可运行上位机软件，如图 19 所示。

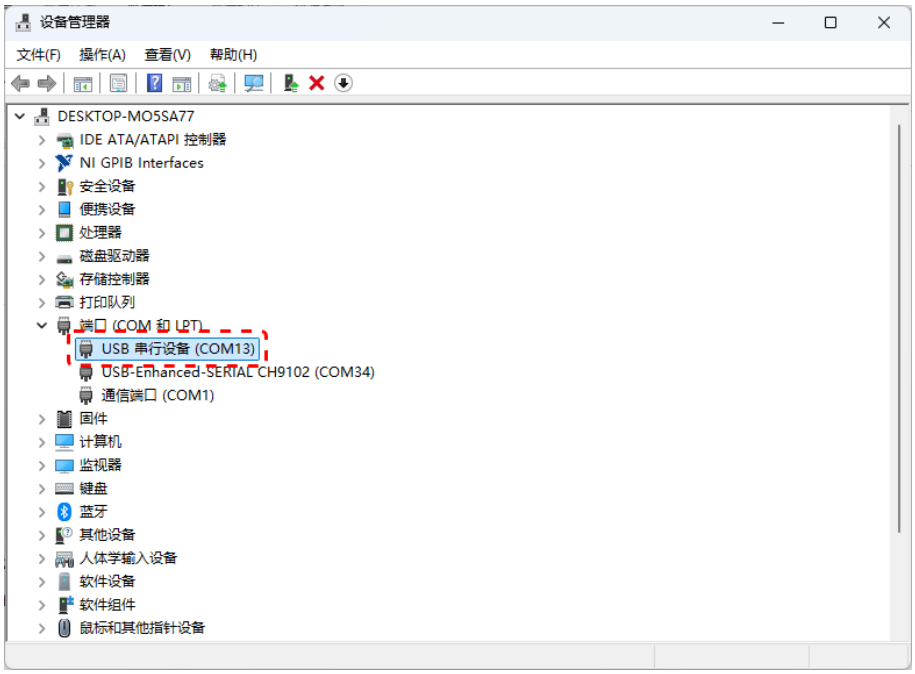


图 19. 在设备管理器中确认仪器 COM 端口（端口号示例）

使用网口与仪器通信时，无需安装 USB 驱动程序。

Windows 7/8/8.1 用户可从仪器内置资料中的 USB_2.0_Driver 文件夹获取驱动。如未找到适用的驱动程序，请前往官方网站下载 Windows 7/8 适用的驱动并解压到电脑本地文件夹。下载入口如图 20 所示，请以页面标注的适用系统为准。



图 20. USB 驱动程序下载页面

Windows 7/8/8.1 驱动安装步骤：

1、使用具有管理员权限的账户登录 Windows，通过 USB 线连接 PC 电脑与 OE2011，并确认仪器已开机。

2、打开【设备管理器】，找到连接仪器后新增的设备。未安装驱动时，设备可能位于“其他设备”中，或带有黄色感叹号；设备名称以实际显示为准。

3、右键单击该设备，选择【更新驱动程序】（部分系统显示为【更新驱动程序软件】），再选择【浏览我的电脑以查找驱动程序】，如图 21 所示。



图 21. 选择驱动程序搜索方式（界面示例）

4、单击【浏览】，选择 USB_2.0_Driver 文件夹，或从官网下载并解压后的对应驱动文件夹。勾选【包括子文件夹】，单击【下一步】，按系统提示完成安装，如图 22 所示。不同 Windows 版本的界面文字可能略有差异；图中的路径仅为示例，请选择驱动实际所在的文件夹。

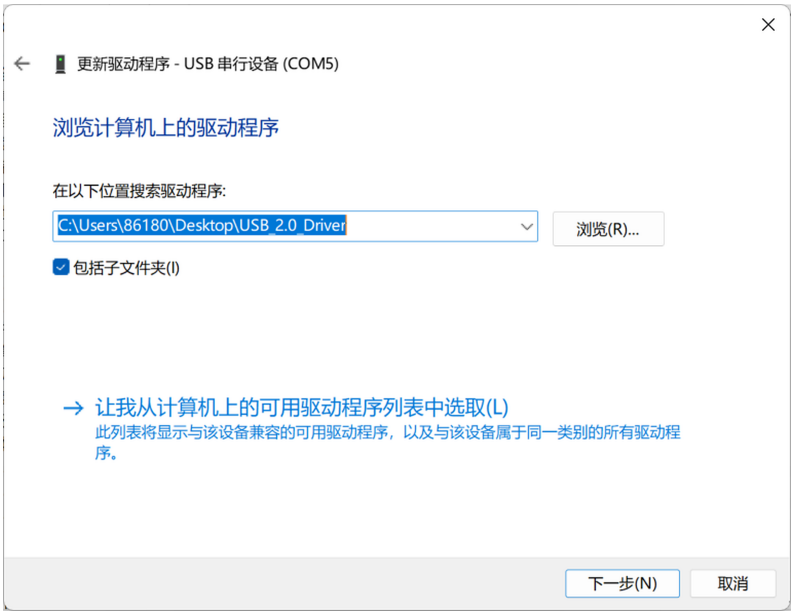


图 22. 选择 USB 驱动文件夹（路径示例）

5、安装完成后，返回【设备管理器】，确认对应设备无黄色感叹号。使用 USB 串口驱动时，可在“端口（COM 和 LPT）”中查看对应端口。若系统提示重新启动，请按提示操作。

若安装失败或未找到匹配的驱动，请确认驱动适用于所用 Windows 版本及系统位数，并检查仪器电源、USB 线和电脑 USB 接口；仍无法识别时，请记录提示信息并联系技术支持。

4.1.3. 运行上位机软件

1、打开仪器内置资料中的 LIA_Console 文件夹，将上位机软件压缩包复制到 PC 电脑本地文件夹。

2、右键单击压缩包，选择【全部解压缩】，或使用解压工具完整解压软件。请保留软件目录中的 DLL 文件及各子文件夹，不要直接在压缩包中运行程序，也不要仅复制 EXE 文件单独运行。

3、打开解压后的软件文件夹，双击“Lucid Suite LIA.exe”启动软件，如图 23 所示。软件版本及启动程序名称以实际提供的文件为准。



名称	修改日期	类型	大小
configs.db	2026/6/29 15:39	Data Base File	60 KB
Lucid Suite LIA.exe	2026/6/8 14:27	应用程序	17,268 KB
libfftw3-3.dll	2022/6/7 9:52	应用程序扩展	2,650 KB
libfftw3f-3.dll	2022/6/7 9:52	应用程序扩展	2,708 KB
libfftw3l-3.dll	2022/6/7 9:52	应用程序扩展	1,219 KB
Qt5QuickControls2.dll	2020/3/28 4:36	应用程序扩展	375 KB

图 23. 上位机软件启动程序

4、通过 USB 线或网线连接 PC 电脑与 OE2011。软件启动后等待片刻，即可自动识别已连接的仪器，如图 24 所示：



图 24. SSI Lucid Suite 启动界面

通过点击按钮，即会连接到仪器。连接成功后，SSI Lucid Suite 界面会变为图 25 所示。

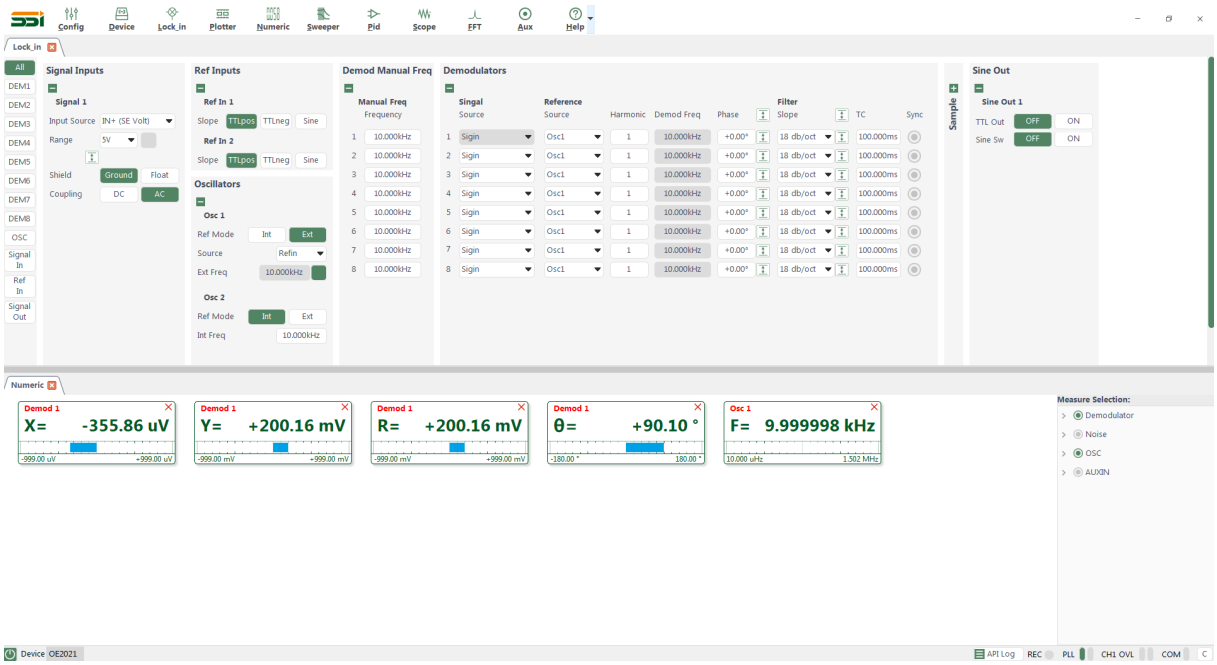


图 25. SSI Lucid Suite 界面

4.2 上位机概述

OE2011 配套有上位机软件 SSI Lucid Suite。SSI Lucid Suite 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框图来展现锁相放大器的功能配置，相比于屏幕界面，SSI Lucid Suite 更加易用易懂。同时 SSI Lucid Suite 支持高速传输和本地数据保存，方便用户对数据进行后期处理分析。SSI Lucid Suite 的界面如图 26 所示：

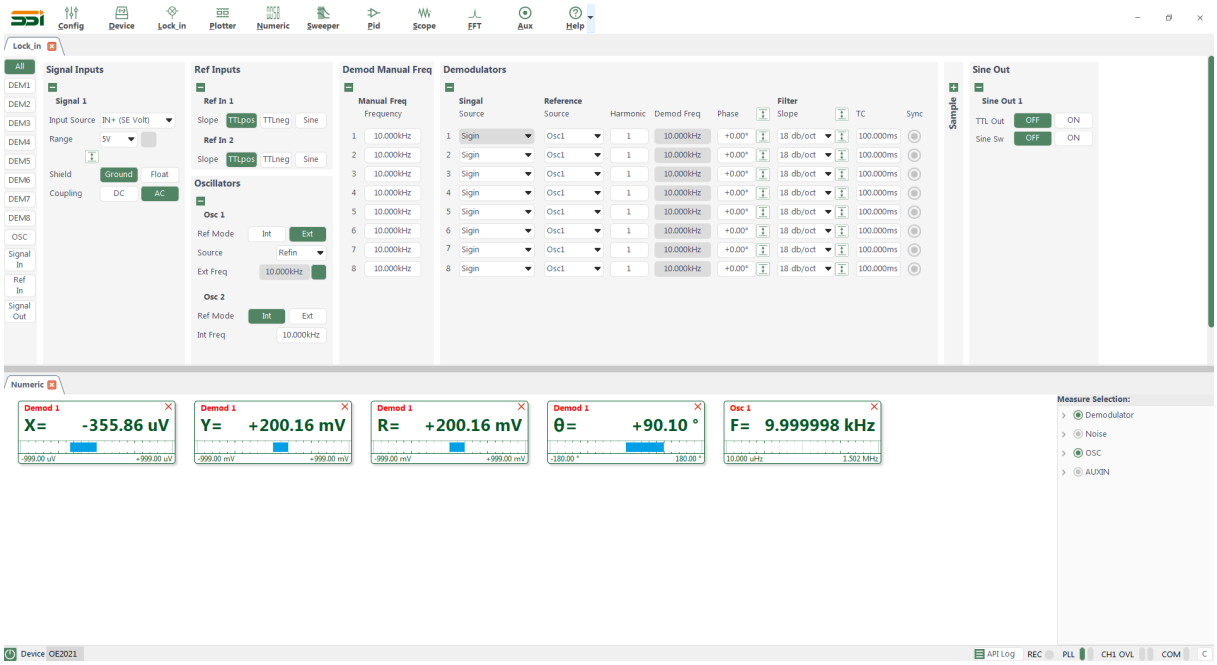


图 26. SSI Lucid Suite 软件界面

SSI Lucid Suite 主要分开 4 个选项卡区域，分别是功能菜单区域、上配置区域、下配置区域以

及状态栏区域。每个区域的作用为：

功能菜单区域：可在本区域选择仪器不同的功能，选择各功能会在配置区域创建对应的选项卡界面。

上、下配置区域：配置区域分开上、下两个区域，每个配置区都可放置不同功能的选项卡界面，并且可以随意交换位置。默认状态下，上配置区展示 Lock_in 的功能界面，可配置锁相放大器解调器的核心功能；下配置区展示 Numeric 功能界面，以数值形式显示测量结果。

状态栏区域：展现锁相放大器的基本状态，包括：指令设置历史日志、数据记录状态、Overload 溢出状态、通讯状态。

各个区域的位置如图 27 所示。



图 27. SSI Lucid Suite 区域位置

4.3 上位机功能介绍

4.3.1. 功能菜单

如图 28 所示为 SSI Lucid Suite 上位机软件的功能菜单区域，本区域从左到右的功能依次是：

Config：仪器连接菜单，可断开或者重新连接仪器。

Device：查看仪器的型号、序列号、版本号、接口状态等基本信息。

Lock_in：可设置和查询锁相放大器的核心功能的相关配置。

Plotter：可显示解调器测量结果的曲线图。

Numeric：显示各个解调器、振荡器测量结果的数值。

Sweeper：仪器的内部扫描功能，可选择频率/幅度的扫描模式。Sweeper 能够扫描规定范围内的仪器参数，方便用户测量系统响应曲线。

PID：仪器内置的 PID 模块，OE2011 拥有 2 个 PID 模块，可控制锁相放大器的多个变量。

Scope：示波器功能，通过仪器内部的高速 ADC 实现虚拟示波器功能。可辅助查看待测信号的波形。

FFT：查看示波器的数据对应的 FFT 频域波形图。

Aux：查询仪器的 Aux In 的测量值，设置 Aux Out 的输出公式。

Help：查看公司信息，获取仪器升级等功能。

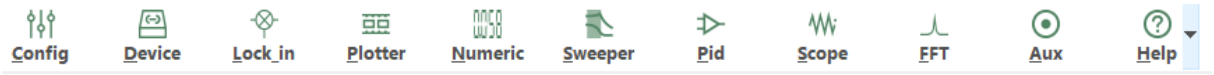


图 28. 功能菜单区域

4.3.2. Lock_in 选项卡

Lock_in（锁相）配置选项卡如图 29 所示，包含锁相放大器核心功能——解调器与锁相环的详细配置，可在本区域设置各个变量。在本区域最左侧的侧边栏里，可选择 ALL 与 DEM 1～8、Osc、Signal In 等标签，切换参数表视图和流程框图的显示，参数表视图详细显示各个参数的情况，而流程框图可为用户提供仪器内部硬件与算法结构的流程图（图 30），方便用户理解各个参数的作用。

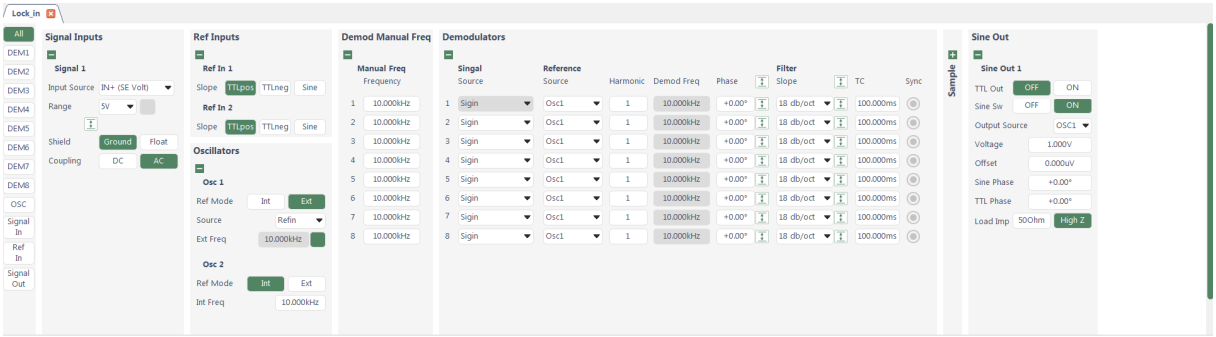


图 29. Lock_in 配置选项卡（参数表视图）

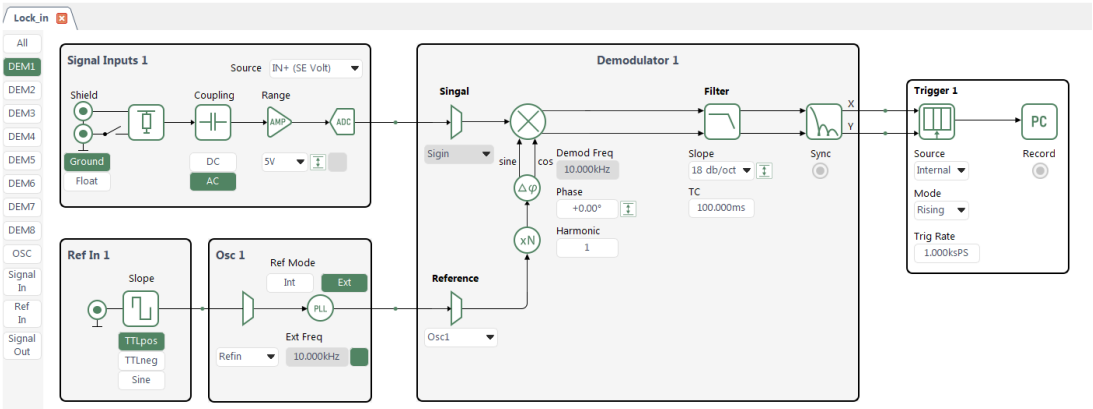


图 30. Lock_in 配置选项卡（流程框图）

4.3.3. Plotter 选项卡

Plotter（绘图仪）选项卡如图 31 所示，可以滚动显示时域数据的变化图形，灵活缩放水平轴和垂直轴，增加不同的测量值显示，切换线性/对数坐标，显示当前波形的最大最小值等，功能丰富。还可以单独保存当前波形图数据用于后续分析处理。

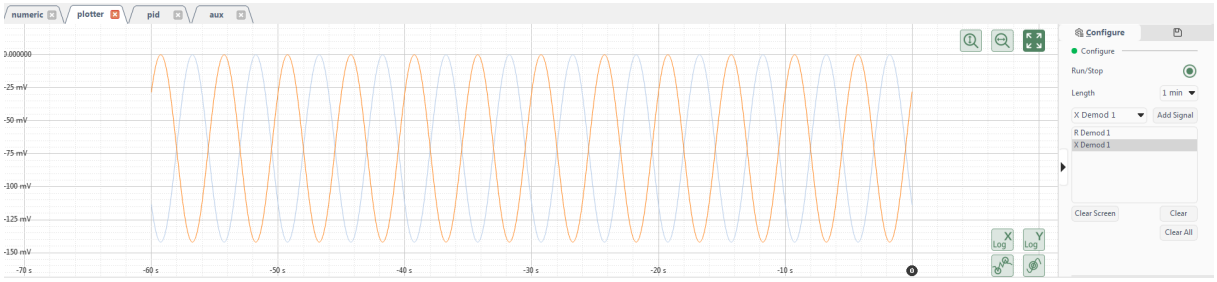


图 31. Plotter（绘图仪）选项卡

4.3.4. Scope 选项卡

Scope（示波器）选项卡如图 32 所示，通过仪器内部的高速 ADC 实现虚拟示波器功能，可以实时显示当前测量信号的波形。可灵活缩放水平轴和垂直轴，拥有波形测量值统计、Cursor 游标功能、触发功能等示波器常用功能，功能丰富。还可以单独保存当前波形数据用于后续分析处理。

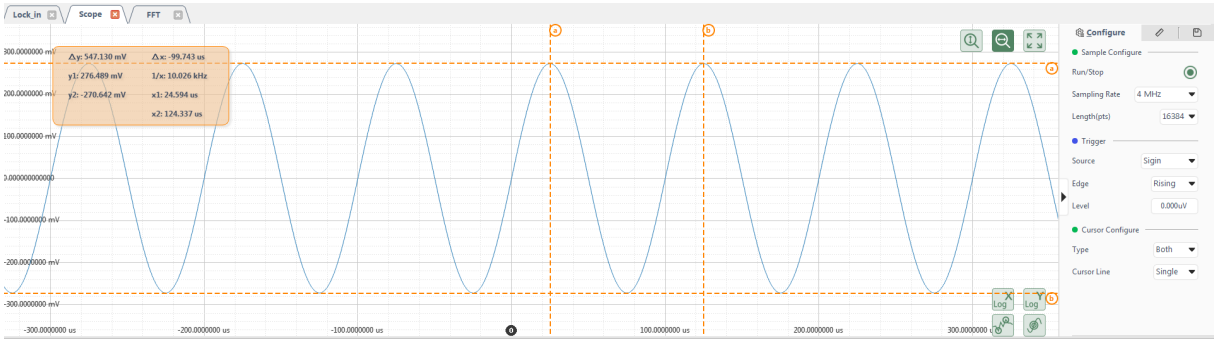


图 32. Scope（示波器）选项卡

4.3.5. FFT 选项卡

FFT（快速傅里叶变换）选项卡如图 33 所示，通过把示波器的数据进行快速傅里叶变换转换成频域图，可以辅助分析输入信号的有效成分，帮助用户确认谐波信号和干扰信号的成分。

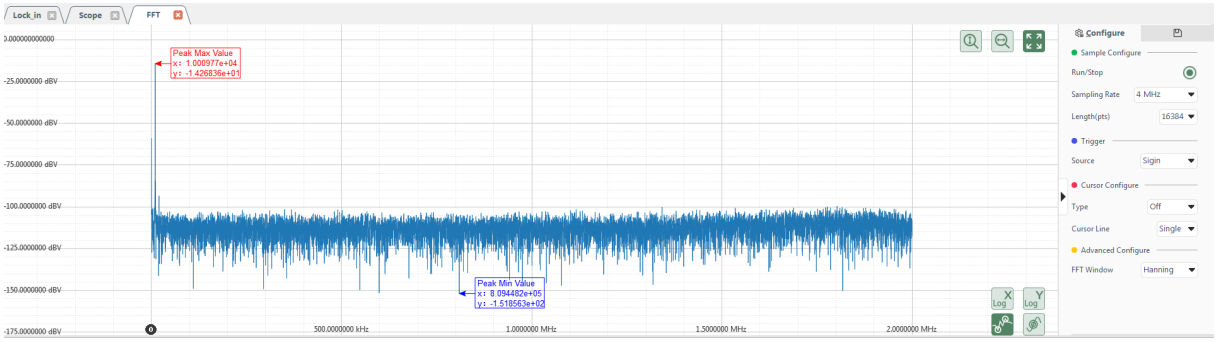


图 33. FFT（快速傅里叶变换）选项卡

4.3.6. Sweeper 选项卡

Sweeper（参数扫描仪）选项卡如图 34 所示，Sweeper 能够扫描规定范围内的仪器参数，方便用户测量系统响应曲线。可对待测系统的幅频特性曲线、相频特性曲线、噪声谱曲线、幅值线性度等进行测试。

Sweeper（参数扫描仪）可选择频率/幅度的扫描模式，可设置线性、比例步进扫描。每次扫描即对 OE2011 的全部测量数据进行捕获，可从多维度分析结果。

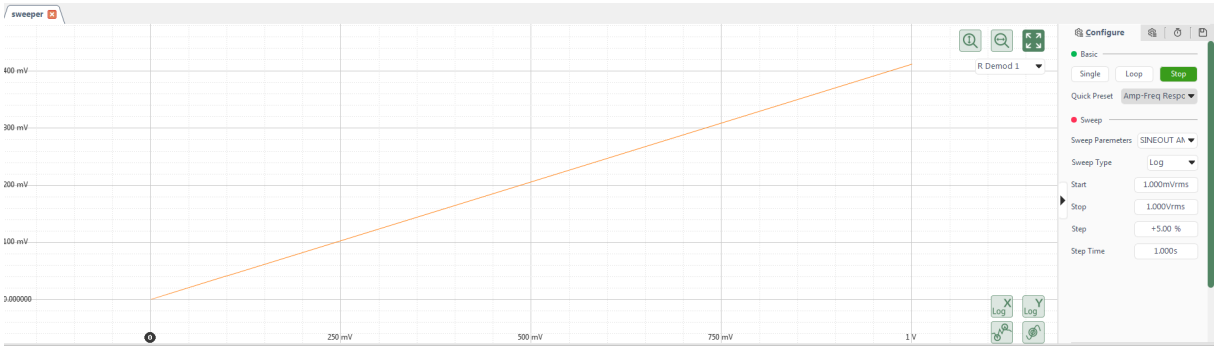


图 34. Sweeper（参数扫描仪）选项卡

4.3.7. PID 选项卡

OE2011 内置两通道 PID 控制器，如图 35 所示。PID 控制器最高 4 MHz 采样速率，PID 输入信号和输出信号可以选择仪器的多个参量，使用范围极其广泛，可用于多种不同的应用场景，如激光同步锁频或高速 SPM。其所有可连接的接口见图 36。

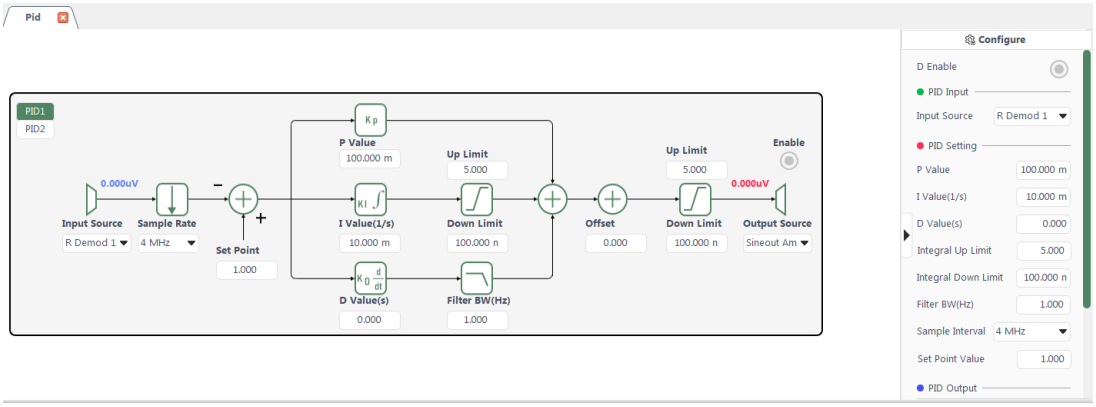


图 35. PID 选项卡

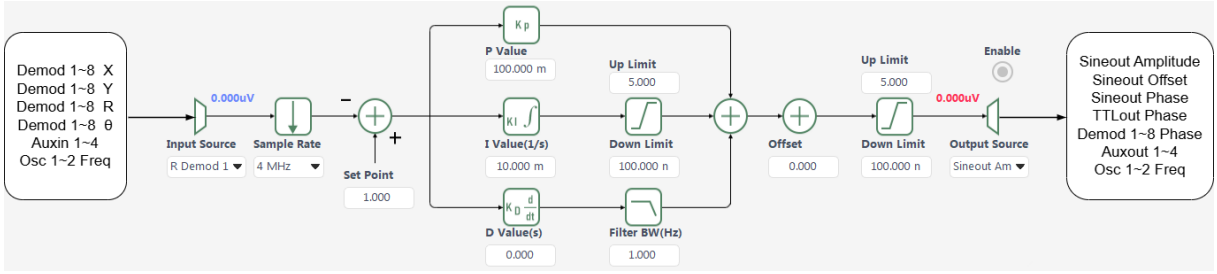


图 36. PID 控制器输入与输出源选择

PID 选项卡中的部分设置与可从其他选项卡访问的设置是共通的。如果 PID 输出控制某个变量，例如 Sineout Amplitude（信号输出幅值），则该变量在其他选项卡中（在此例为 Lock-in（锁相）选项卡）显示为只读，PID 的输出值会覆盖原来的参数配置。

4.4 软件使用范例

本使用范例将简单演示如何使用 OE2011 上位机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 4.1 的说明，成功连接 OE2011 与 PC 机，然后就可以开始进行配置了。

假设用户需要按照表 4 对函数发生器与锁相放大器进行设置，并进行数据保存：

表 4. 实例配置表

输入信号类型	单端电压输入
输入信号大小	40 mV (RMS)
输入耦合方式	AC
输入量程	50 mV
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
解调器移相角度	0°
低通滤波器的时间常数	100 ms
滤波器陡降	24 dB/oct
数据采样率	100 SPS

要完成以上设置，具体操作步骤如下：

1. 根据表 4 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 37 和图 38 所示，选择其中一种方式进行修改。

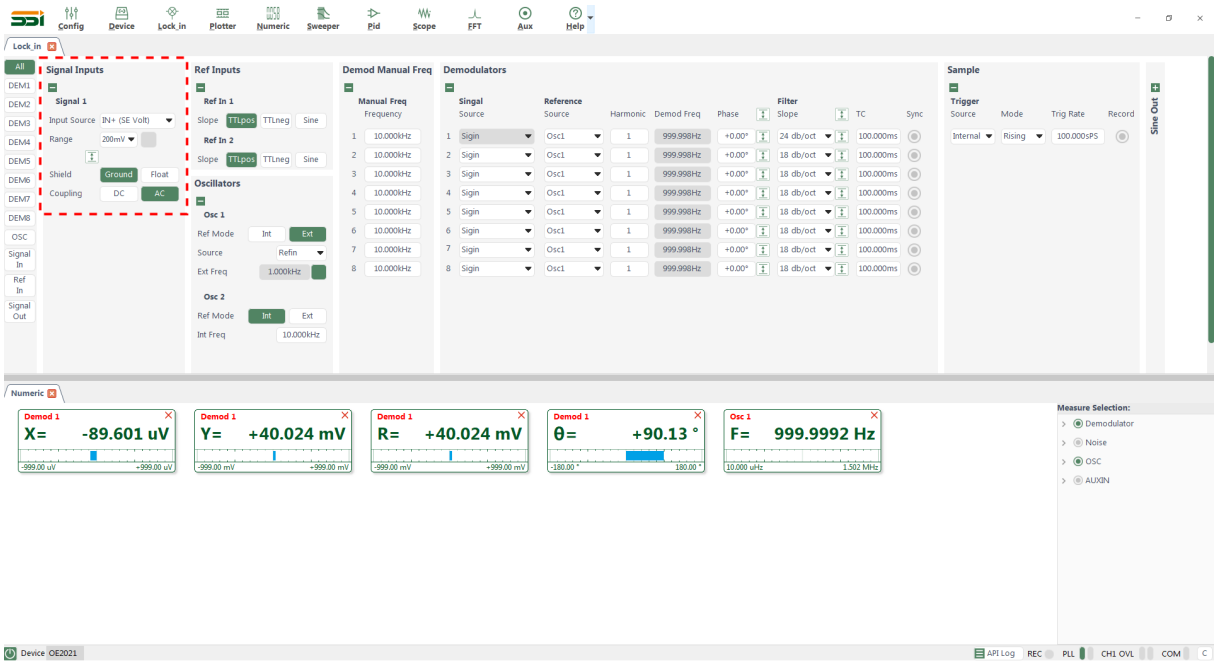


图 37. 输入信号配置区域

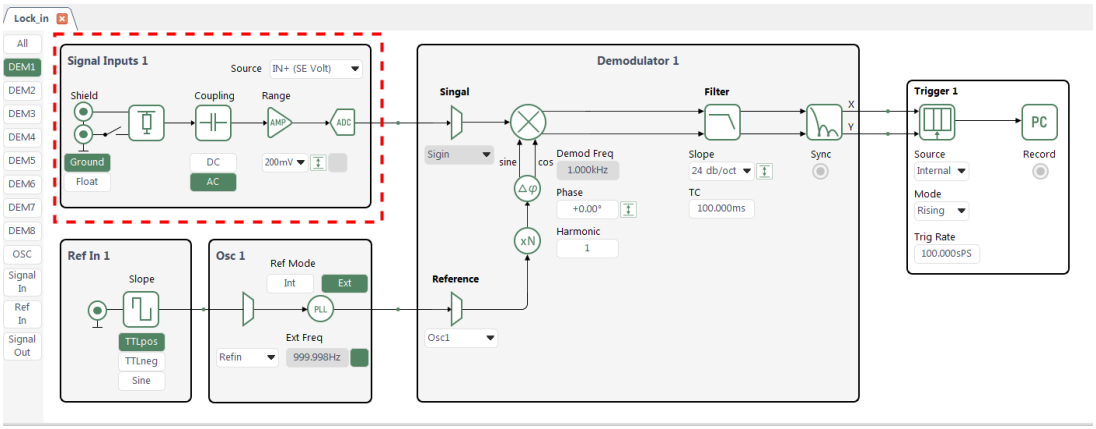


图 38. 流程框图的输入信号配置区域

2. 根据表 4 配置，在参考信号配置区域选择参考信号源类型、外部参考，其它选项默认，如图 39 和图 40 所示，选择其中一种方式进行修改。

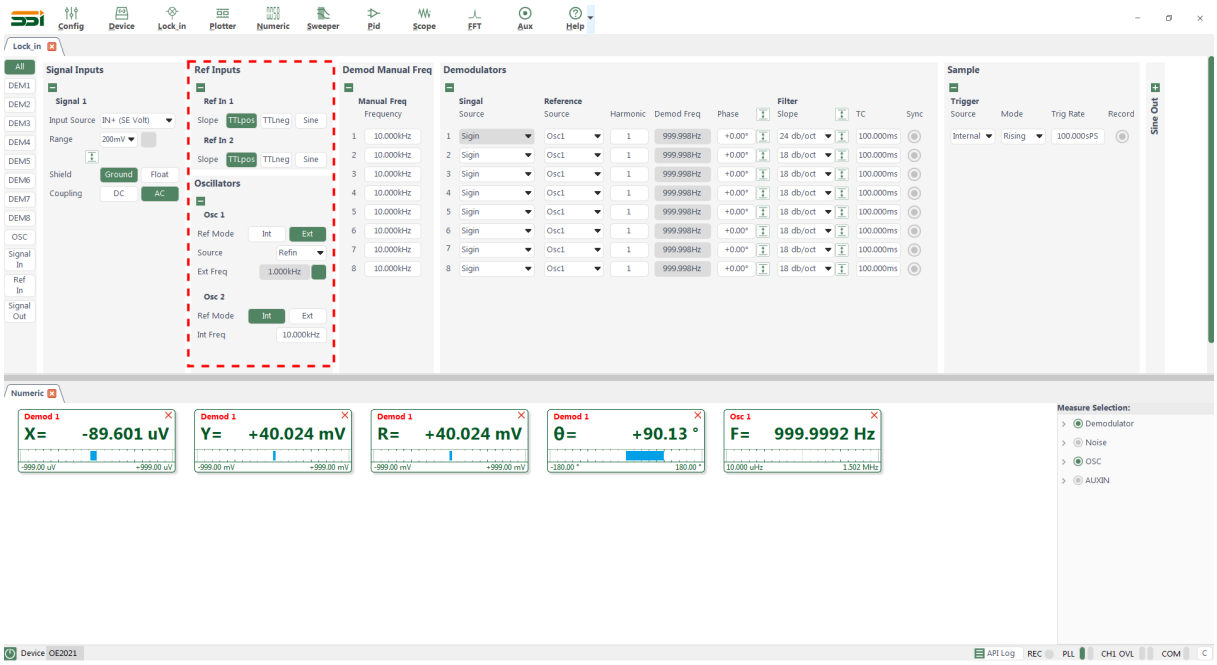


图 39. 参考信号配置图

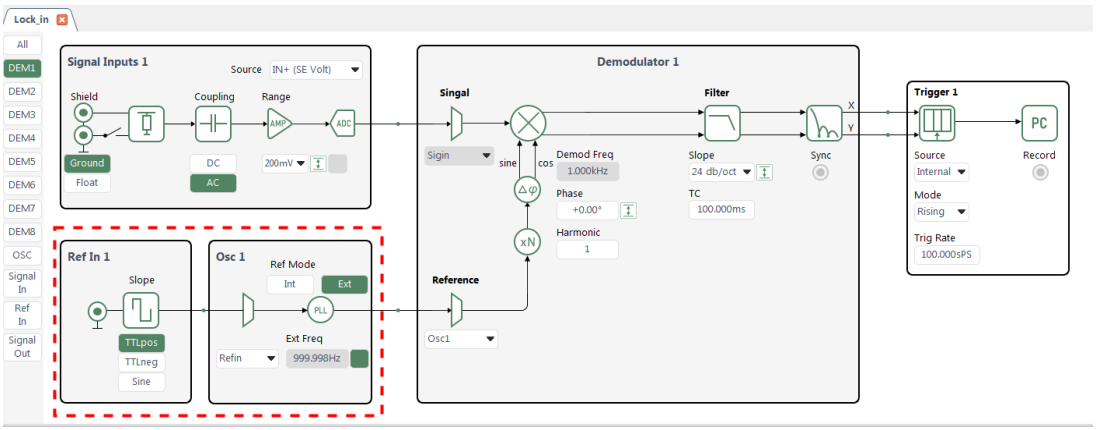


图 40. 流程框图的参考信号配置区域

3．根据表 4，在滤波器配置区域选择解调器的时间常数、滤波器陡降和相位调整值，其它选项默认，如图 41 和图 42 所示，选择其中一种方式进行修改，完成配置。

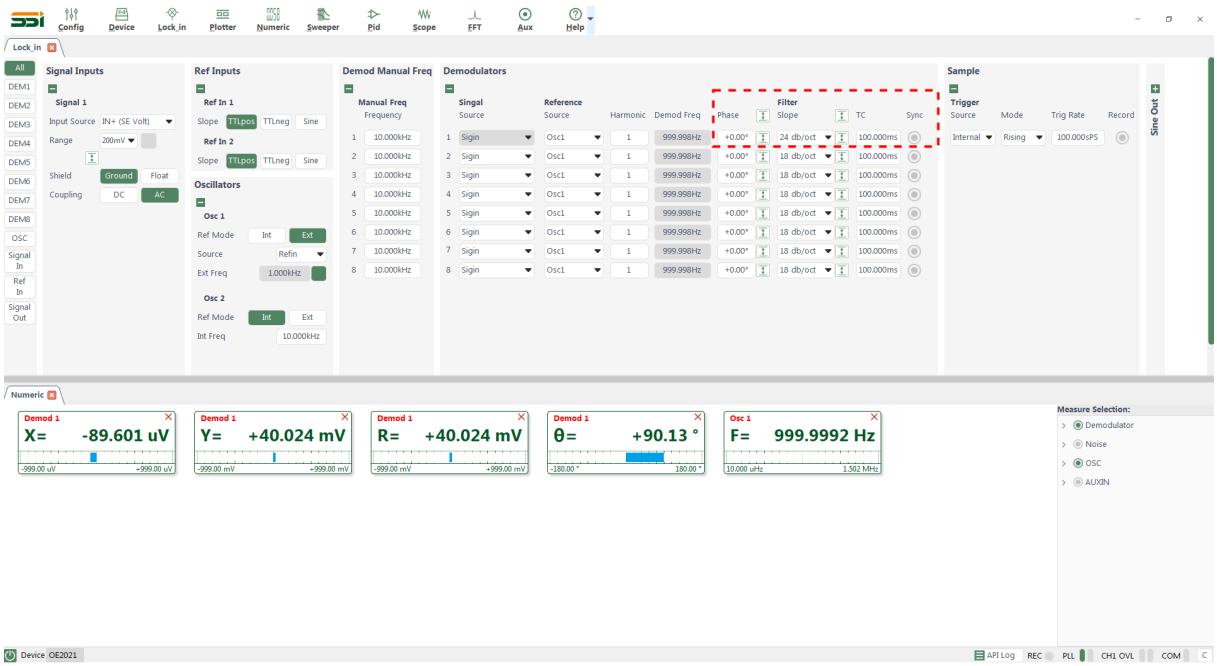


图 41. 滤波器配置图

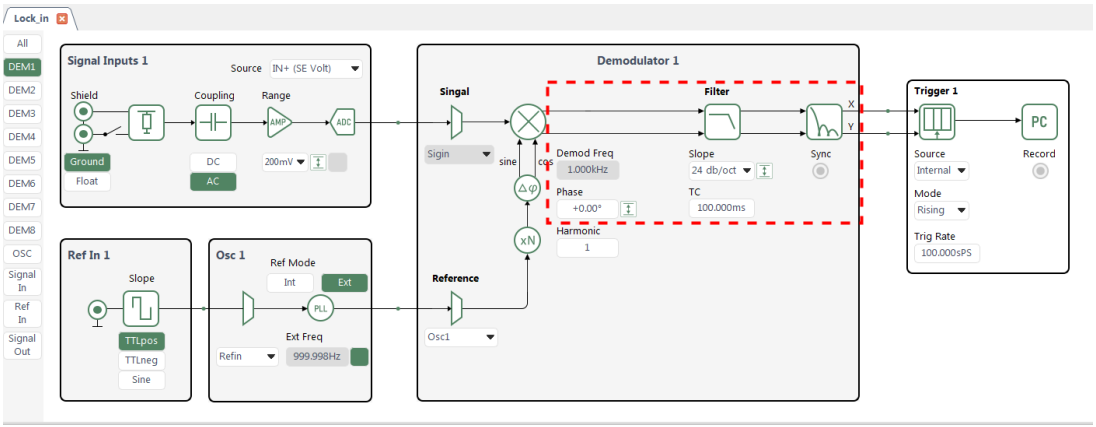


图 42. 流程框图的滤波器配置区域

4. 若想配置其他解调器，在图 43 所示的红框区域中，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。

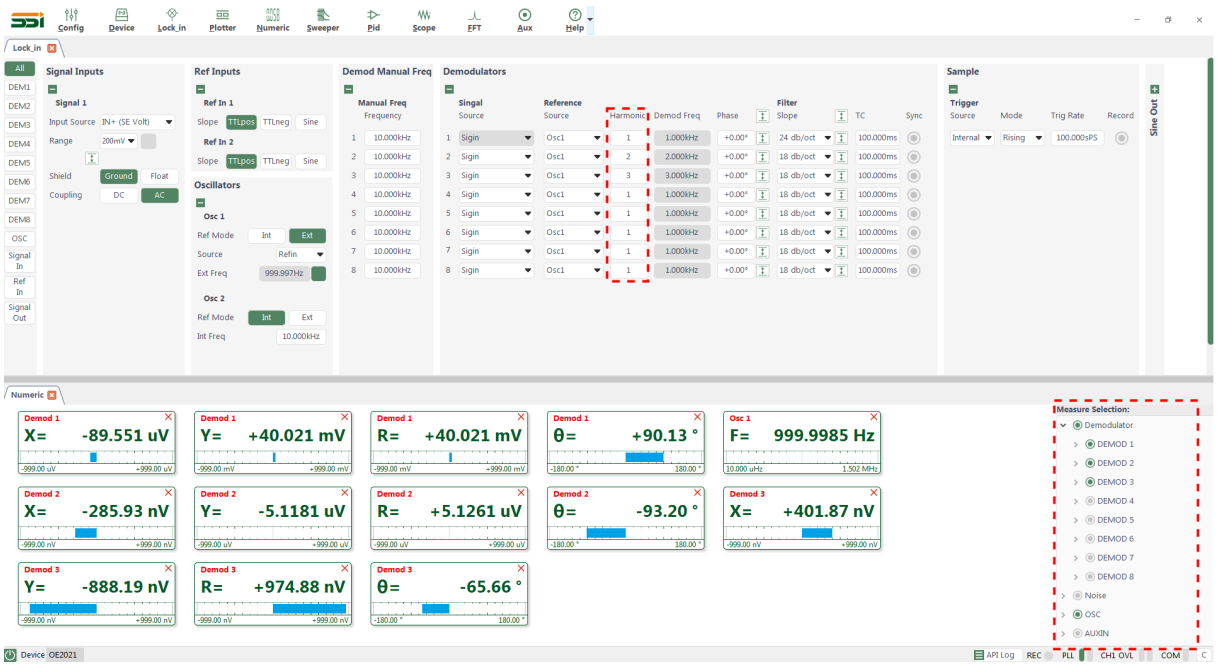


图 43. 其他解调器配置图

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

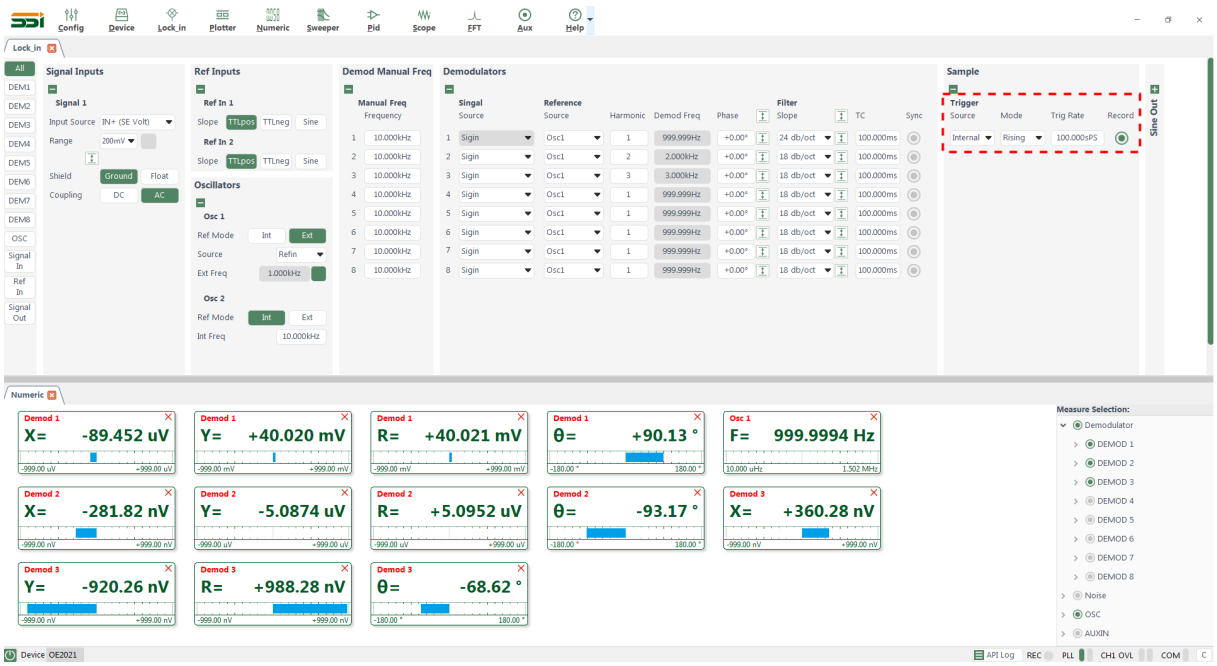
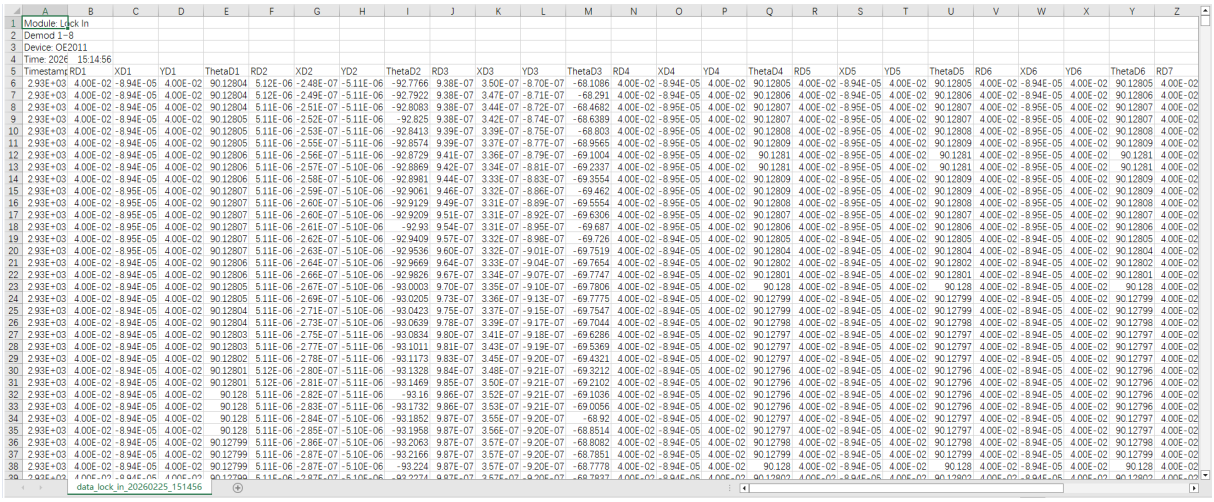


图 44. 数据保存中

如图 44 所示，点击红框内按钮“Record”，当按钮处于选中状态时，表示正在保存当前采集的数据。

数据以 Excel 表格的形式保存在程序目录下，文件名为“data_lock_in_xxxxx.csv”，储存有 8 个解调器的数据，如图 45 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	Module: Lock In																									
2	Demod 1-8																									
3	Device: OE2011																									
4	Time: 2026	15:14:56																								
5	Timestamp	RD1	XD1	YD1	ThetaD1	RD2	XD2	YD2	ThetaD2	RD3	XD3	YD3	ThetaD3	RD4	XD4	YD4	ThetaD4	RD5	XD5	YD5	ThetaD5	RD6	XD6	YD6	ThetaD6	RD7
6	2.93E+03	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12804	5.12E-06	-2.48E-07	-5.11E-06	-92.7766	9.38E-07	3.50E-07	-8.70E-07	-68.1086	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12805	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12805	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12805	4.00E-02
7	2.93E+03	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12804	5.12E-06	-2.49E-07	-5.11E-06	-92.7922	9.38E-07	3.47E-07	-8.71E-07	-68.291	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12806	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12806	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12806	4.00E-02
8	2.93E+03	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12804	5.11E-06	-2.51E-07	-5.11E-06	-92.8083	9.38E-07	3.44E-07	-8.72E-07	-68.4682	4.00E-02	-8.95E-05	4.00E-02	90.12807	4.00E-02	-8.95E-05	4.00E-02	90.12807	4.00E-02	-8.95E-05	4.00E-02	90.12807	4.00E-02
9	2.93E+03	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12805	5.11E-06	-2.52E-07	-5.11E-06	-92.825	9.38E-07	3.42E-07	-8.74E-07	-68.6389	4.00E-02	-8.95E-05	4.00E-02	90.12807	4.00E-02	-8.95E-05	4.00E-02	90.12807	4.00E-02	-8.95E-05	4.00E-02	90.12807	4.00E-02
10	2.93E+03	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12805	5.11E-06	-2.53E-07	-5.11E-06	-92.8413	9.39E-07	3.39E-07	-8.75E-07	-68.803	4.00E-02	-8.95E-05	4.00E-02	90.12808	4.00E-02	-8.95E-05	4.00E-02	90.12808	4.00E-02	-8.95E-05	4.00E-02	90.12808	4.00E-02
11	2.93E+03	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12805	5.11E-06	-2.55E-07	-5.11E-06	-92.8574	9.39E-07	3.37E-07	-8.77E-07	-68.9565	4.00E-02	-8.95E-05	4.00E-02	90.12809	4.00E-02	-8.95E-05	4.00E-02	90.12809	4.00E-02	-8.95E-05	4.00E-02	90.12809	4.00E-02
12	2.93E+03	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12806	5.11E-06	-2.56E-07	-5.11E-06	-92.8729	9.41E-07	3.36E-07	-8.79E-07	-69.1004	4.00E-02	-8.95E-05	4.00E-02	90.1281	4.00E-02	-8.95E-05	4.00E-02	90.1281	4.00E-02	-8.95E-05	4.00E-02	90.1281	4.00E-02
13	2.93E+03	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12806	5.11E-06	-2.57E-07	-5.10E-06	-92.8869	9.42E-07	3.34E-07	-8.81E-07	-69.2337	4.00E-02	-8.95E-05	4.00E-02	90.1281	4.00E-02	-8.95E-05	4.00E-02	90.1281	4.00E-02	-8.95E-05	4.00E-02	90.1281	4.00E-02
14	2.93E+03	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12806	5.11E-06	-2.58E-07	-5.10E-06	-92.8981	9.44E-07	3.33E-07	-8.83E-07	-69.3554	4.00E-02	-8.95E-05	4.00E-02	90.12809	4.00E-02	-8.95E-05	4.00E-02	90.12809	4.00E-02	-8.95E-05	4.00E-02	90.12809	4.00E-02
15	2.93E+03	4.00E-02	-8.95E-05	4.00E-02	90.12807	5.11E-06	-2.59E-07	-5.10E-06	-92.9061	9.46E-07	3.32E-07	-8.86E-07	-69.462	4.00E-02	-8.95E-05	4.00E-02	90.12809	4.00E-02	-8.95E-05	4.00E-02	90.12809	4.00E-02	-8.95E-05	4.00E-02	90.12809	4.00E-02
16	2.93E+03	4.00E-02	-8.95E-05	4.00E-02	90.12807	5.11E-06	-2.60E-07	-5.10E-06	-92.9129	9.49E-07	3.31E-07	-8.89E-07	-69.5554	4.00E-02	-8.95E-05	4.00E-02	90.12808	4.00E-02	-8.95E-05	4.00E-02	90.12808	4.00E-02	-8.95E-05	4.00E-02	90.12808	4.00E-02
17	2.93E+03	4.00E-02	-8.95E-05	4.00E-02	90.12807	5.11E-06	-2.60E-07	-5.10E-06	-92.9209	9.51E-07	3.31E-07	-8.92E-07	-69.6306	4.00E-02	-8.95E-05	4.00E-02	90.12807	4.00E-02	-8.95E-05	4.00E-02	90.12807	4.00E-02	-8.95E-05	4.00E-02	90.12807	4.00E-02
18	2.93E+03	4.00E-02	-8.95E-05	4.00E-02	90.12807	5.11E-06	-2.61E-07	-5.10E-06	-92.93	9.54E-07	3.31E-07	-8.95E-07	-69.687	4.00E-02	-8.95E-05	4.00E-02	90.12806	4.00E-02	-8.95E-05	4.00E-02	90.12806	4.00E-02	-8.95E-05	4.00E-02	90.12806	4.00E-02
19	2.93E+03	4.00E-02	-8.95E-05	4.00E-02	90.12807	5.11E-06	-2.62E-07	-5.10E-06	-92.9409	9.57E-07	3.32E-07	-8.98E-07	-69.726	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12805	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12805	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12805	4.00E-02
20	2.93E+03	4.00E-02	-8.95E-05	4.00E-02	90.12807	5.11E-06	-2.63E-07	-5.10E-06	-92.9536	9.60E-07	3.32E-07	-9.01E-07	-69.7519	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12804	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12804	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12804	4.00E-02
21	2.93E+03	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12806	5.11E-06	-2.64E-07	-5.10E-06	-92.9669	9.64E-07	3.33E-07	-9.04E-07	-69.7654	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12802	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12802	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12802	4.00E-02
22	2.93E+03	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12806	5.11E-06	-2.66E-07	-5.10E-06	-92.9826	9.67E-07	3.34E-07	-9.07E-07	-69.7747	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12801	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12801	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12801	4.00E-02
23	2.93E+03	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12805	5.11E-06	-2.67E-07	-5.10E-06	-93.0003	9.70E-07	3.35E-07	-9.10E-07	-69.7806	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.128	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.128	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.128	4.00E-02
24	2.93E+03	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12805	5.11E-06	-2.69E-07	-5.10E-06	-93.0205	9.73E-07	3.36E-07	-9.13E-07	-69.7775	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12799	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12799	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12799	4.00E-02
25	2.93E+03	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12804	5.11E-06	-2.71E-07	-5.10E-06	-93.0423	9.75E-07	3.37E-07	-9.15E-07	-69.7547	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12799	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12799	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12799	4.00E-02
26	2.93E+03	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12804	5.11E-06	-2.73E-07	-5.10E-06	-93.0639	9.78E-07	3.39E-07	-9.17E-07	-69.7044	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12798	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12798	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12798	4.00E-02
27	2.93E+03	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12803	5.11E-06	-2.75E-07	-5.11E-06	-93.0834	9.80E-07	3.41E-07	-9.18E-07	-69.6286	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12797	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12797	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12797	4.00E-02
28	2.93E+03	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12803	5.11E-06	-2.77E-07	-5.11E-06	-93.1011	9.81E-07	3.43E-07	-9.19E-07	-69.5369	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12797	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12797	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12797	4.00E-02
29	2.93E+03	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12802	5.11E-06	-2.78E-07	-5.11E-06	-93.1173	9.83E-07	3.45E-07	-9.20E-07	-69.4321	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12797	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12797	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12797	4.00E-02
30	2.93E+03	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12801	5.12E-06	-2.80E-07	-5.11E-06	-93.1328	9.84E-07	3.48E-07	-9.21E-07	-69.3212	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12796	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12796	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12796	4.00E-02
31	2.93E+03	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12801	5.12E-06	-2.81E-07	-5.11E-06	-93.1469	9.85E-07	3.50E-07	-9.21E-07	-69.2102	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12796	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12796	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12796	4.00E-02
32	2.93E+03	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.128	5.11E-06	-2.82E-07	-5.11E-06	-93.16	9.86E-07	3.52E-07	-9.21E-07	-69.1036	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12796	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12796	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12796	4.00E-02
33	2.93E+03	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.128	5.11E-06	-2.83E-07	-5.11E-06	-93.1732	9.86E-07	3.53E-07	-9.21E-07	-69.0056	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12796	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12796	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12796	4.00E-02
34	2.93E+03	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.128	5.11E-06	-2.84E-07	-5.10E-06	-93.1852	9.87E-07	3.55E-07	-9.20E-07	-68.92	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12797	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12797	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12797	4.00E-02
35	2.93E+03	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.128	5.11E-06	-2.85E-07	-5.10E-06	-93.1958	9.87E-07	3.56E-07	-9.20E-07	-68.8514	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12797	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12797	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12797	4.00E-02
36	2.93E+03	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12799	5.11E-06	-2.86E-07	-5.10E-06	-93.2063	9.87E-07	3.57E-07	-9.20E-07	-68.8082	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12798	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12798	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12798	4.00E-02
37	2.93E+03	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12799	5.11E-06	-2.87E-07	-5.10E-06	-93.2166	9.87E-07	3.57E-07	-9.20E-07	-68.7851	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12799	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12799	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12799	4.00E-02
38	2.93E+03	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12799	5.11E-06	-2.87E-07	-5.10E-06	-93.224	9.87E-07	3.57E-07	-9.20E-07	-68.7778	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.128	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.128	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.128	4.00E-02
39	2.93E+03	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12799	5.11E-06	-2.87E-07	-5.10E-06	-93.2274	9.87E-07	3.57E-07	-9.20E-07	-68.7837	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12802	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12802	4.00E-02	-8.94E-05	4.00E-02	90.12802	4.00E-02

data_lock_in_20260225_151456

图 45. 数据记录文档内容示例

第 5 章 界面与上位机功能

OE2011 主菜单位于前面板键盘控制部分的 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 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 46 右边栏所示：

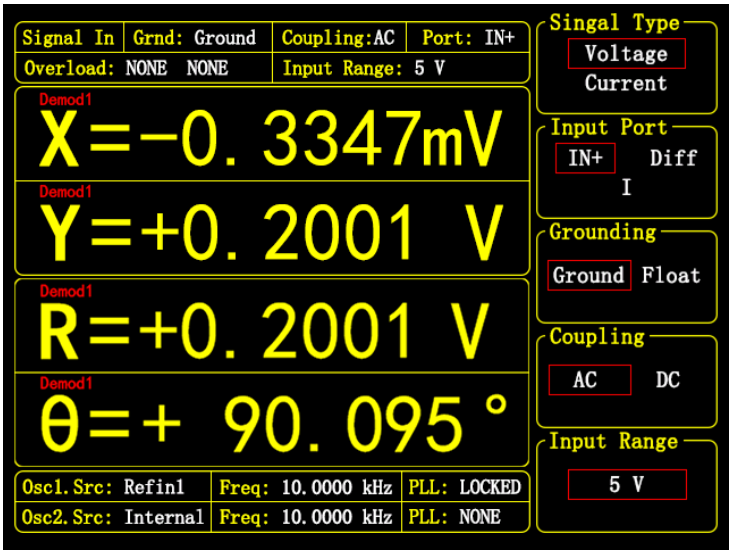


图 46. [INPUT/FILTERS] 子菜单

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

- <Signal Type>：输入信号类型设置
  <Voltage> ：电压信号输入模式。
  <Current> ：电流信号输入模式。
  根据输入信号的类型选择对应的 <Signal Type> 设置。

- <Input Port>：输入接口设置
  <IN+> ：单端电压信号输入模式。
  <Diff> ：差分电压信号输入模式。选择此模式时，将差分信号的一端连接到接口 IN+，另一端连接到接口 IN-。所测量的信号是 IN+ 与 IN-的差值电压。
  <I> ：单端电流信号输入模式。
  需要注意的是，<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 <IN+> 和 <Diff> 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> 的范围。**

- <Grounding>：输入屏蔽层接地设置

<Float> ：IN+ / IN-输入接口的外壳与仪器地通过 10 kΩ 电阻隔离。

<Ground> ：IN+ / IN-输入接口的外壳与仪器地（仪器地已短接在大地—市电 GND 上）通过 10 Ω 电阻短接。

一般认为信号灌入电流的能力不强（不至于烧毁仪器接口芯片），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（<1 mV），建议使用 Ground 模式，但前提要保证信号与仪器的地在同一地电平。**

- <Coupling>：输入耦合设置

<AC> ：交流耦合输入。交流耦合的截止频率在 0.16 Hz，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。直流耦合不会阻隔任何输入信号，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有可能导致信号溢出。

- <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 5 V_{rms}。

<1 V> ：允许输入信号的最大电压有效值为 1 V_{rms}。

<200 mV> ：允许输入信号的最大电压有效值为 200 mV_{rms}。

<50 mV> ：允许输入信号的最大电压有效值为 50 mV_{rms}。

<10 mV> ：允许输入信号的最大电压有效值为 10 mV_{rms}。

<2 mV> ：允许输入信号的最大电压有效值为 2 mV_{rms}。

<1 mV> ：允许输入信号的最大电压有效值为 1 mV_{rms}。

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 5 mA_{rms}。

<500 μA> ：允许输入信号的最大电流有效值为 500 μA_{rms}。

<50 μA> ：允许输入信号的最大电流有效值为 50 μA_{rms}。

<5 μA> ：允许输入信号的最大电流有效值为 5 μA_{rms}。

<500 nA> ：允许输入信号的最大电流有效值为 500 nA_{rms}。

<50 nA> ：允许输入信号的最大电流有效值为 50 nA_{rms}。

<5 nA> ：允许输入信号的最大电流有效值为 5 nA_{rms}。

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最大幅值自动调整到最接近的输入量程，以保证测量精度。

5.1.2. 上位机配置

如图 47 上位机的红框所示配置区域为 [SIGNAL INPUT] 的配置区域，用户可以在参数表或者流程框图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。

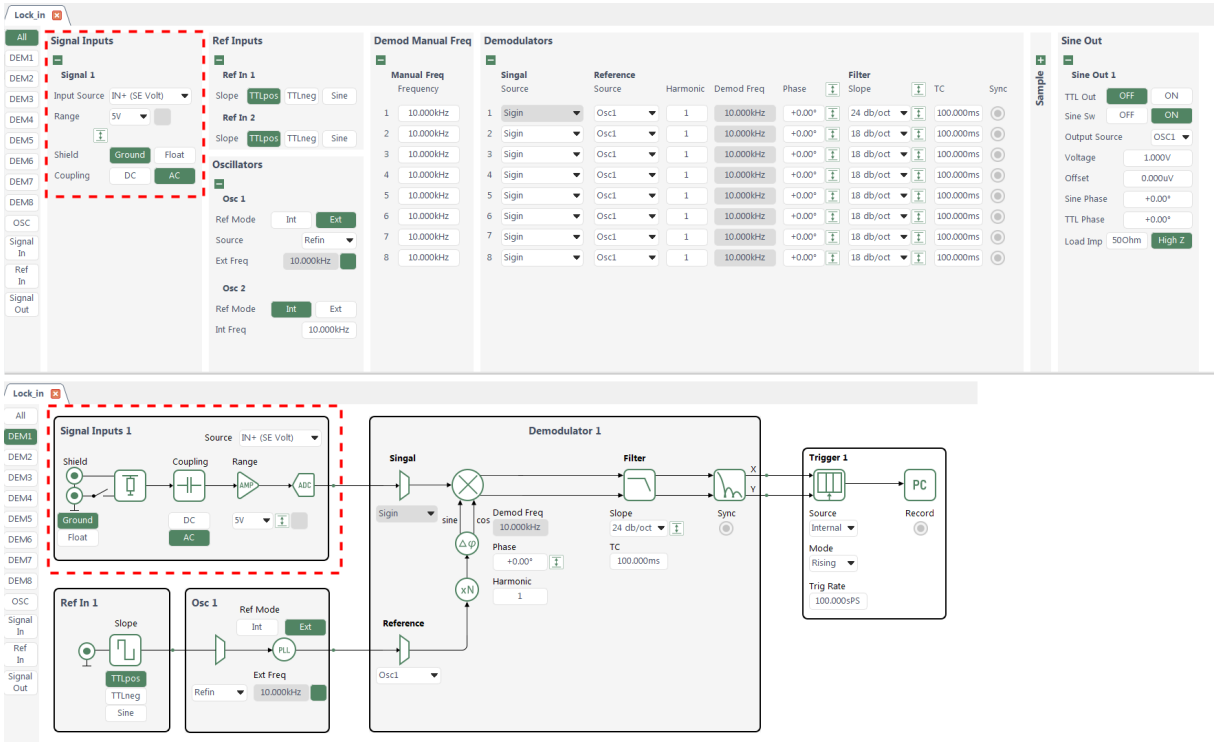


图 47. [SIGNAL INPUT] 的配置区域

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，选择不同的配置模式会有不同的界面切换，如图 48、图 49 所示：

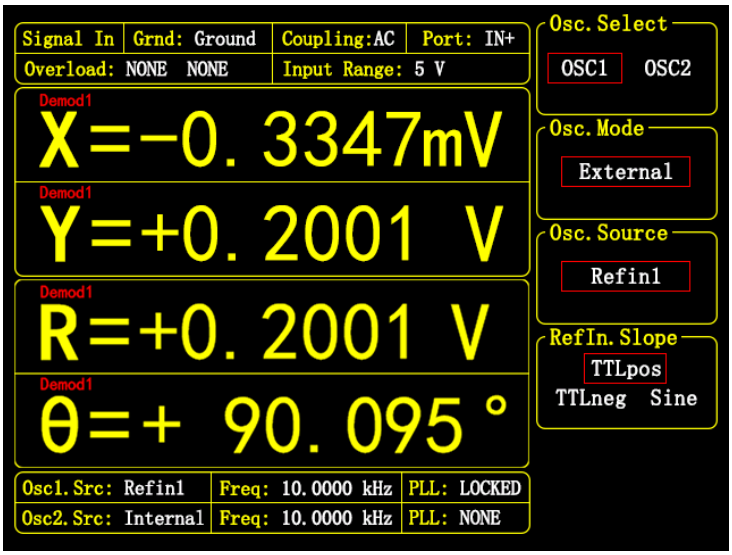


图 48. [OSC REF] 子菜单-<External>

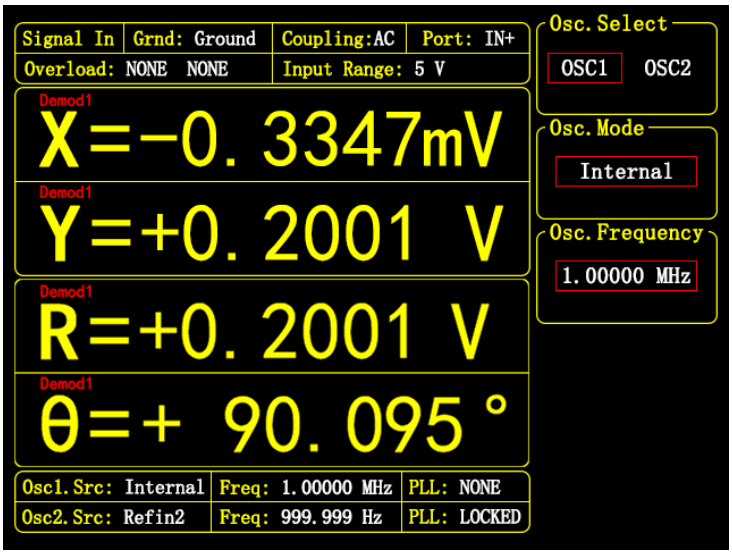


图 49. [OSC REF] 子菜单-<Internal>

此子菜单中包括 <Osc.Select>、<Osc.Mode>、<Osc.Source>、<Osc.Frequency>、<RefIn.Slope> 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>、<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 将当前振荡器设置为外部模式，此时 REFIN-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 48 所示，可以对 <Osc.Source> 进行设置。

<Internal> ：内部模式。OE2011 将当前振荡器设置为内部模式，此设置下振荡器将连接到仪器的内部晶振，由仪器自身产生参考信号。REF IN 输入信号将不起作用。此时的界面如图 49 所示，可以对 <Osc.Frequency> 进行设置。

- <Osc.Source>：参考信号源设置

<Refin1/2> ：将振荡器外部模式时的参考输入源设置为 REF IN，此时可通过 <Ref.Slope> 设置 REF IN 信号的波形类别。要注意的是，<OSC1> 对应的参考接口是 <Refin 1>，<OSC2> 对应的参考接口是 <Refin 2>。

<Sigin> ：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>：REFIN 接口的参考信号类型设置

当 <Osc.Mode> 选择 <External> 且 <Osc.Source> 选择 <Refin 1/2> 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（3 V< V_{IH} <5 V，−0.1 V< V_{IL} <0.5 V）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。占空比越小，会导致高阶谐波越严重，对外的辐射干扰则越强。

- <Osc.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 250 kHz，默认值为 10.000 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 1000 Hz 快速调整为 1100 Hz，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 50 所示。

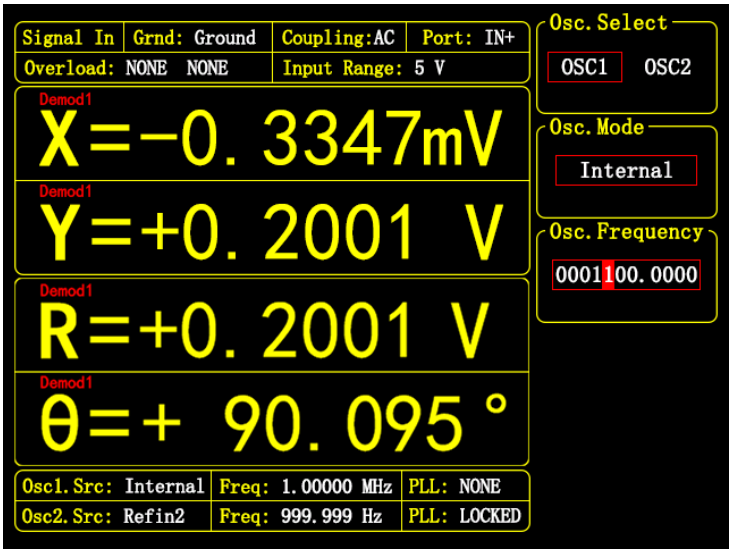


图 50. 通过 [ARROW] 调整频率示意图

5.2.2. 上位机配置

如图 51 上位机的红框所示配置区域为 [OSC REF] 的配置区域，用户可以在参数表或者流程框图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>、<Osc.Frequency> 和 <RefIn.Slope> 的配置信息均可在红框里修改确认。

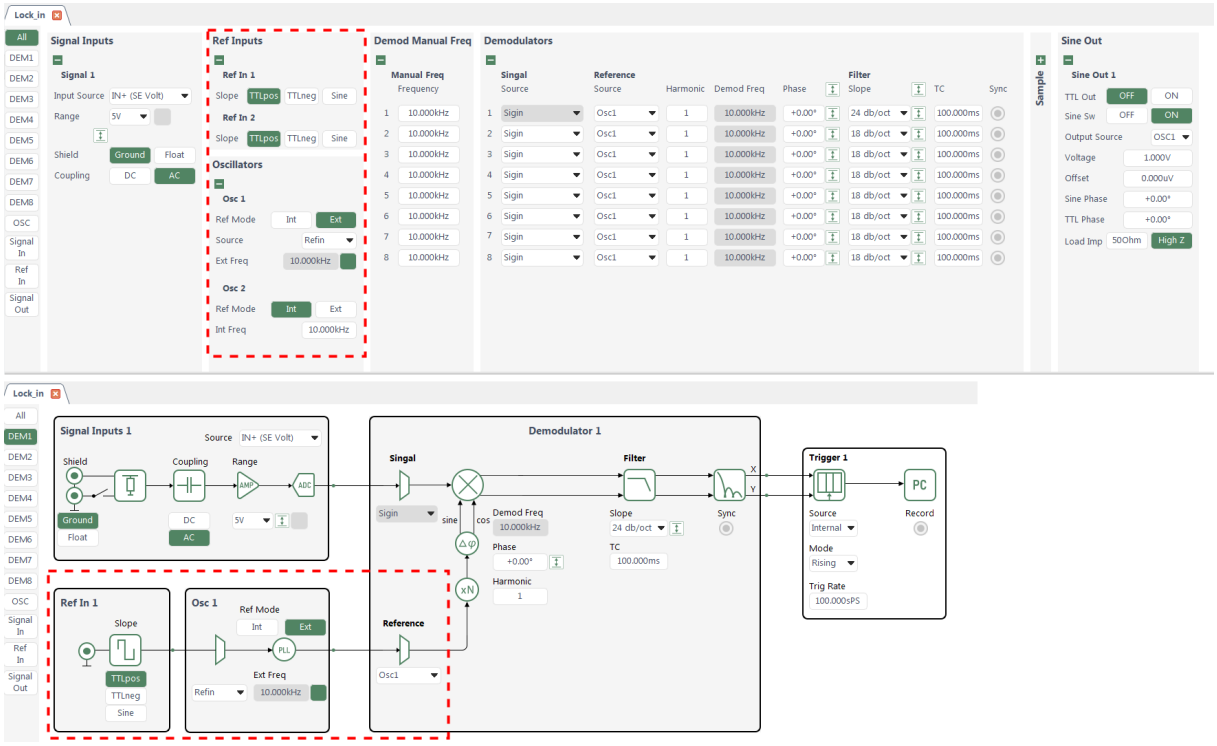


图 51. [OSC REF] 的配置区域

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 52 右边栏所示：

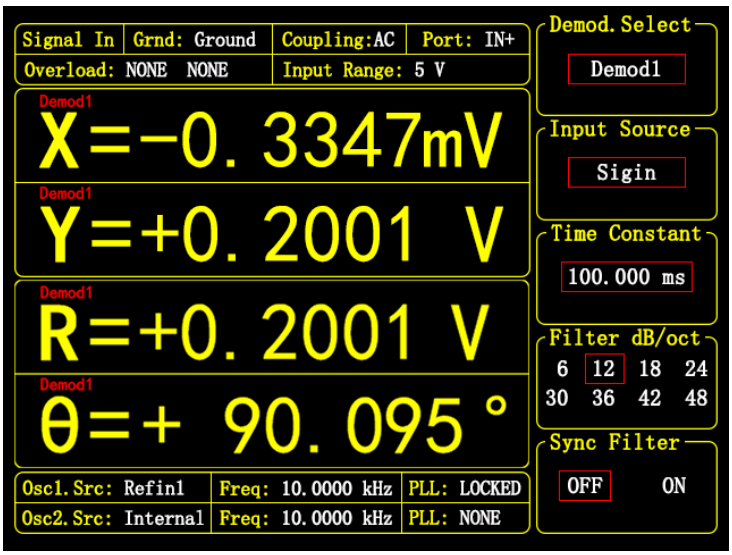


图 52. [DEMOD FILTER] 子菜单

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，此时改变其中配置，不影响其他解调器的相关配置。

- <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 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等。

☆ **注意：Demod1 固定选择 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 ks，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。

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。同步滤波器可在任意状态下开启或关闭；当解调参考频率低于 250 kHz 时，开启即可生效。

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，此时可启用同步滤波器改善效果。效果如图 53 所示。

☆ **注：当 <Demod Frequency> 小于 250 kHz 时，将 <Sync Filter> 设为 <ON> 即可生效。**

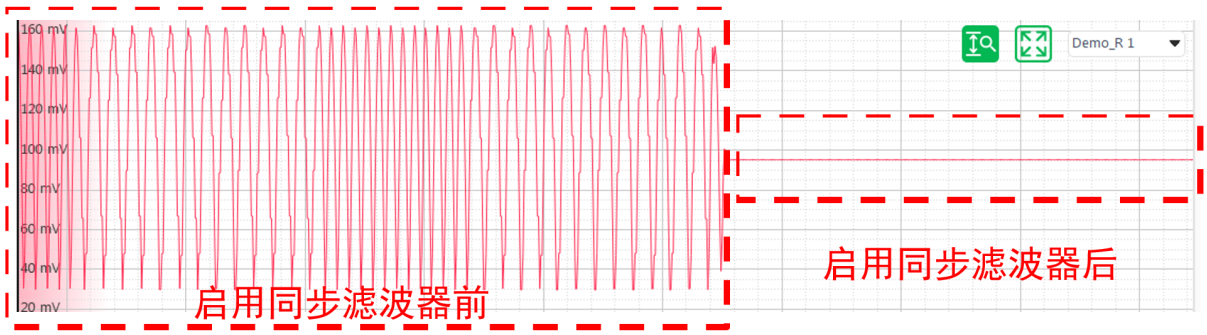


图 53. 开启同步滤波器效果图

5.3.2. 上位机配置

如图 54 上位机的红框所示配置区域为 [DEMOD FILTER] 的配置区域，用户可以在参数表或者流程框图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。

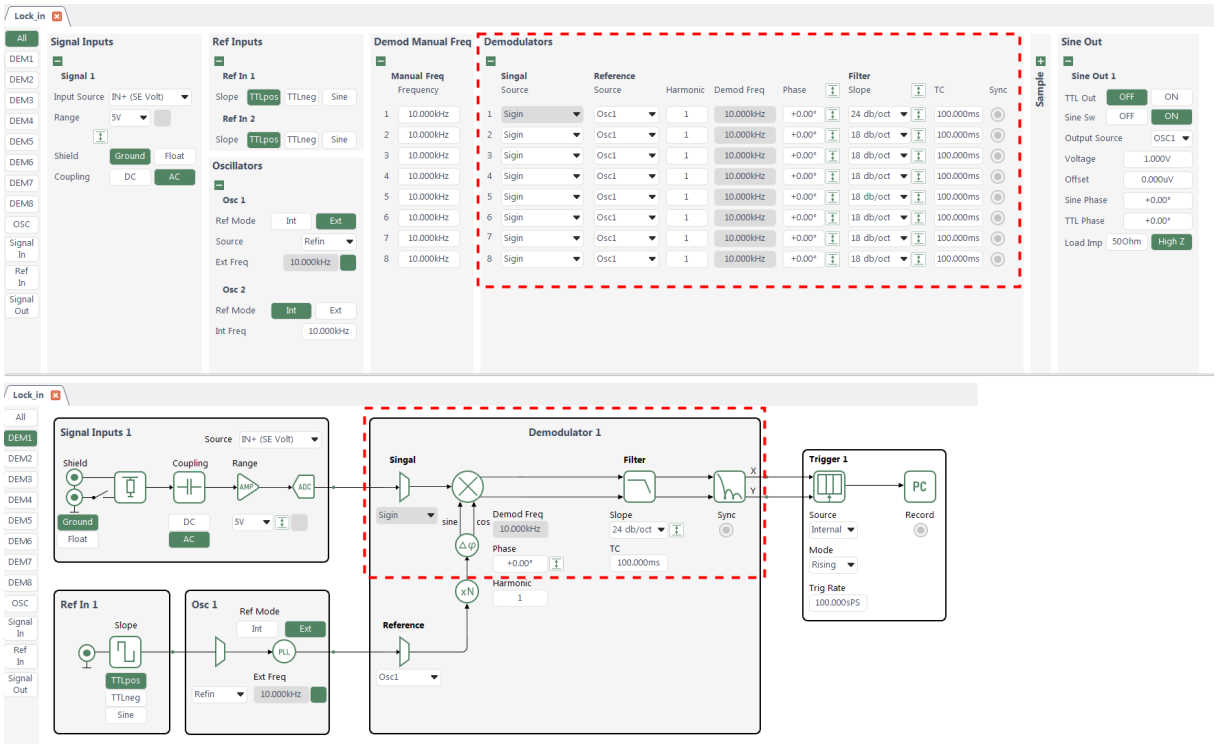


图 54. [DEMOD FILTER] 的配置区域

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 55 右边栏所示：

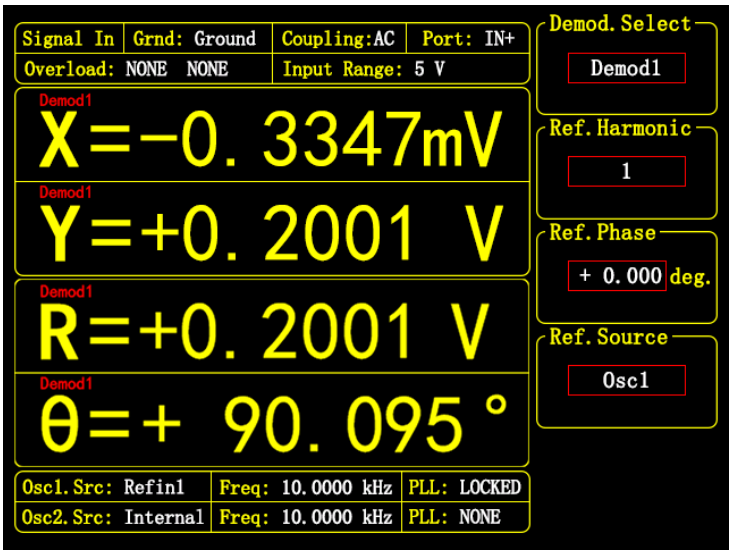


图 55. [DEMOD REF] 子菜单

此子菜单中包括 <Demod.Select>、<Ref.Harmonic>、<Ref.Phase>、<Ref.Source>、<Frequency Set> 和 <FreqComb 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 <Ref.Harmonic>、<Ref.Phase>、<Ref.Source>、<Frequency Set> 的配置都是 <Demod1> 的当前配置，此时改变其中配置，不影响其他解调器的相关配置。

- <Ref.Harmonic >：解调器参考基准的谐波阶数设置

其设置范围是 1~10 000 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 ≤ 250 kHz)。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 1 kHz 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 0.45 A、0、0.15 A、0、0.09 A、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] 子菜单篇章。

- <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,相移角度的输入范围为 −180° ~ 180°，分辨率为 0.001°。

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的上升沿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，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 56 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与内部振荡器保持同相。

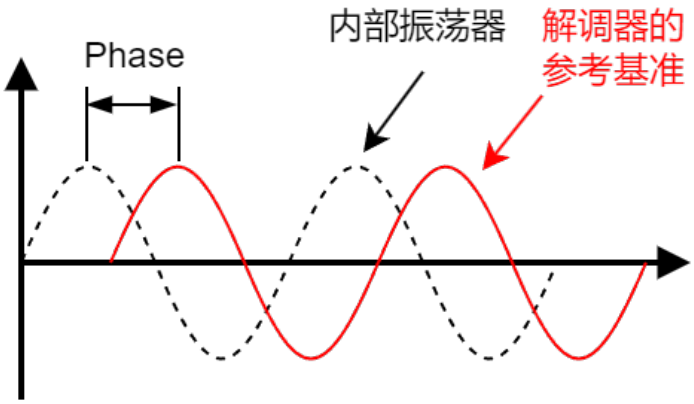


图 56. 相位偏移量对于参考基准的影响

- <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任意频率。此模式界面如图 57 示。

<FreqComb1>：设置当前解调器的参考基准源为频率合成解调。此模式界面如图 58 所示。此时可以点击 <Menu Enter> 进入二级菜单设置频率合成的公式，频率合成模式有 4 个通道 <FreqComb1> 至 <FreqComb4>，独立于解调器通道，每个解调器可以单独设置或者复用同一个 <FreqComb> 通道。

<FreqComb2>：同上。

<FreqComb3>：同上。

<FreqComb4>：同上。

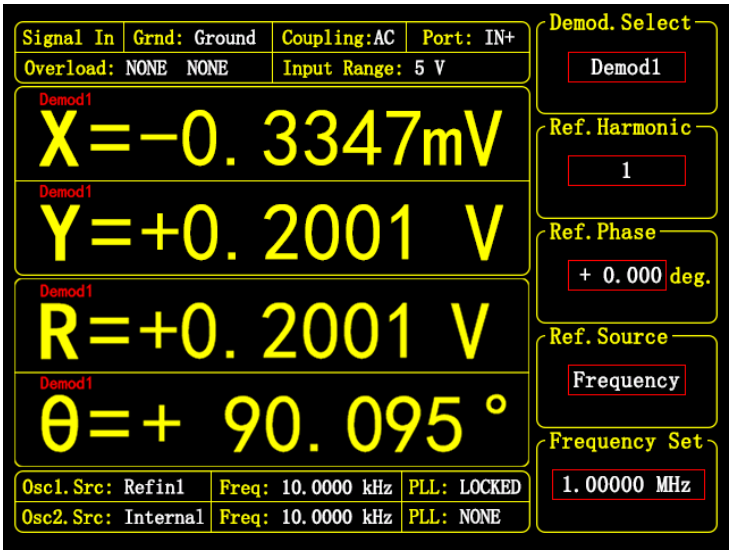


图 57. <Frequency> 模式界面

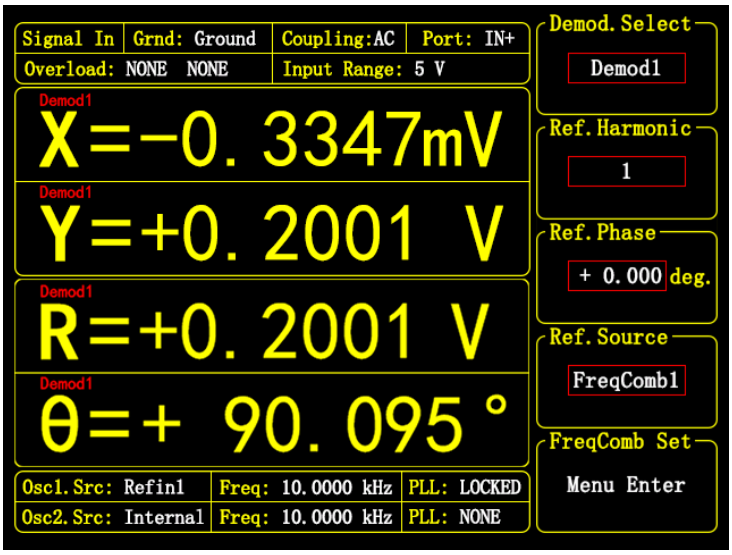


图 58. <FreqComb> 模式界面

- <Frequency Set>：解调器的参考频率设置

当 <Ref.Source> 设置为 <Frequency> 时，可启用本配置项。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，同时解调 8 个频率信息。

- <FreqComb Set>：频率合成的公式设置

当 <Ref.Source> 设置为 <FreqComb1> 至 <FreqComb4> 时，可启用本配置项。此时可以点击 <Menu Enter> 进入二级菜单设置频率合成的公式，如图 59 所示。<FreqComb> 的计算公式为：

$$\mathrm{FreqComb} = \mathrm{A} \times \mathrm{F}_1 + \mathrm{B} \times \mathrm{F}_2$$

其中：

A、B 为有符号实数，取值范围为-10000 ~ +10000，分辨率是 0.001；

F_1、F_2 可选择 OSC1 或者 OSC2 的频率输出结果，或者 Demod1 至 Demod8 的内部任意频率；

若 FreqComb 计算结果是 1500 Hz，则该解调器即以 1500 Hz 为参考频率进行相敏检测算法。本模式在 AM、FM 等信号解调（和频信号与差频信号的解调）场景中有较好的效果。

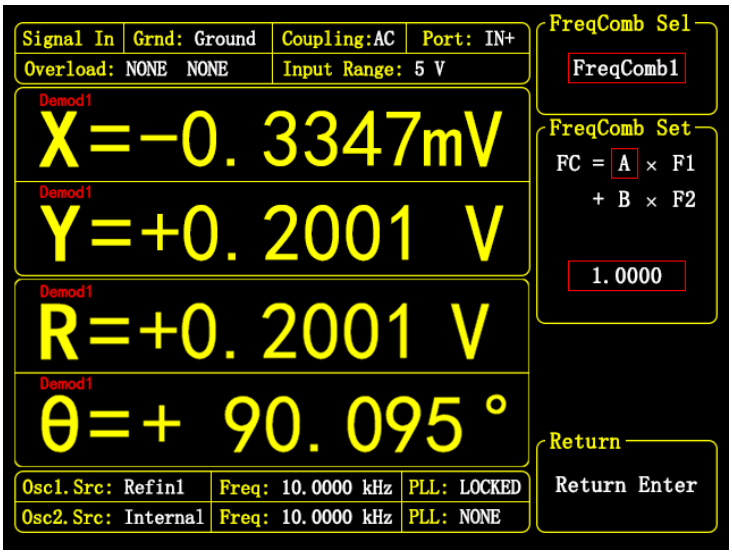


图 59. <FreqComb> 二级菜单设置界面

5.4.2. 上位机配置

如图 60 上位机的红框所示配置区域为 [DEMOD REF] 的配置区域，用户可以在参数表或者流程框图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 <FreqComb Set> 的配置信息均可在红框里修改确认。

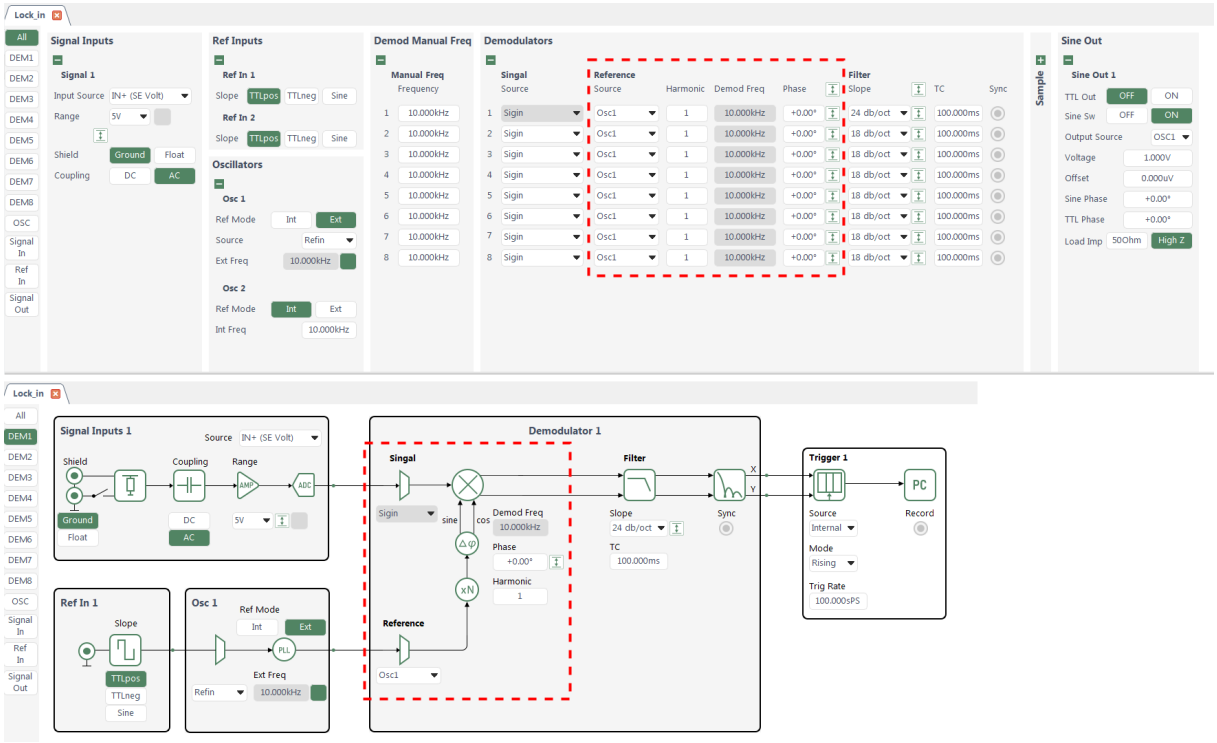


图 60. [DEMOD REF] 的配置区域

而 <FreqComb Set> 的配置公式界面如图 61 所示，用户可以在上位机的流程框图区域设置频率合成的计算公式，A、B、F_1、F_2 的配置信息均可在红框里修改确认。

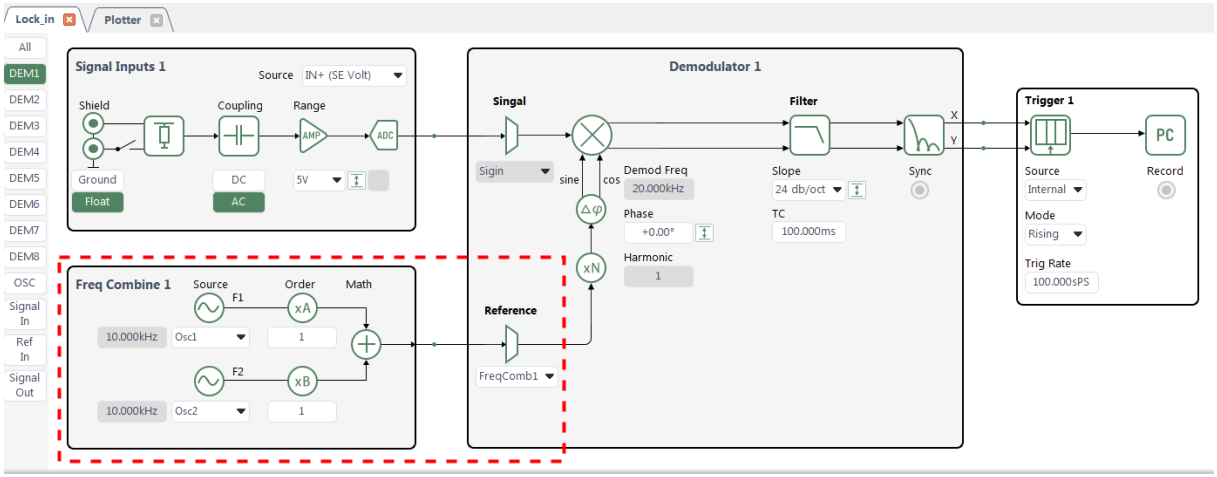


图 61. [DEMOD REF] 的 FreqComb 公式配置区域

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 62 右边栏所示：

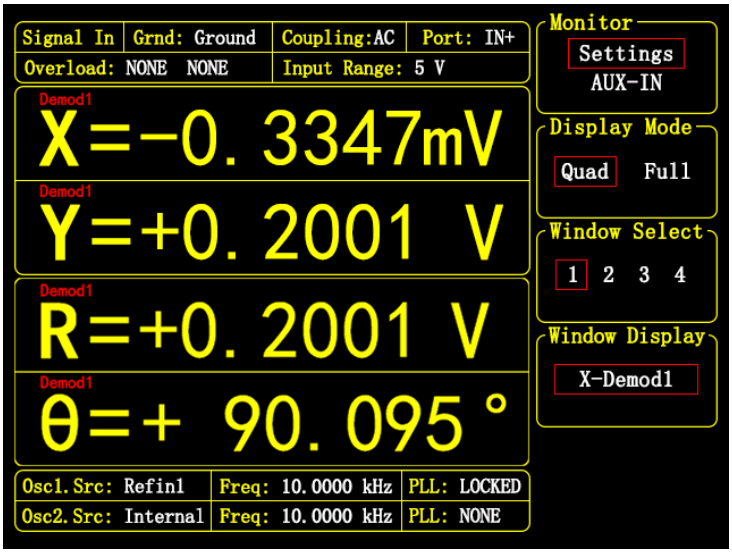


图 62. [DISPLAY] 子菜单

[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 接口的实时输入电压幅值。界面如图 63 所示：

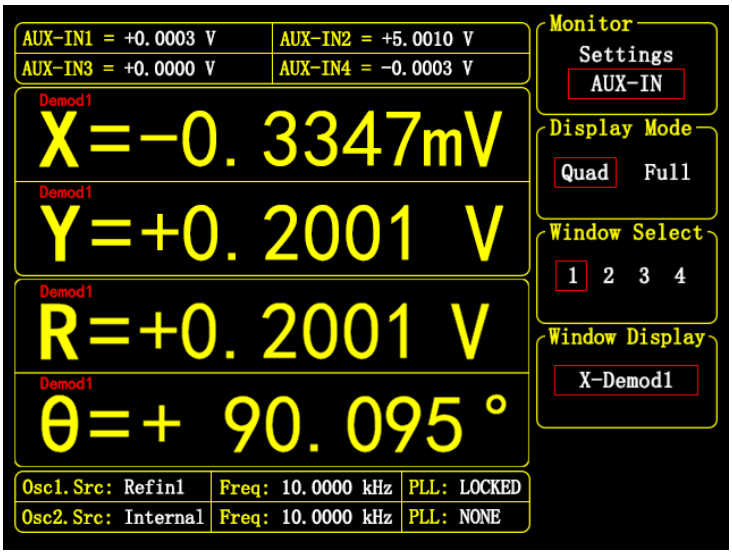


图 63. <AUX-IN> 界面

- <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。此模式如图 62 所示。

  <Full> ：全数据显示模式，同时显示 8 个解调器的测量数据。此模式如图 64 所示。

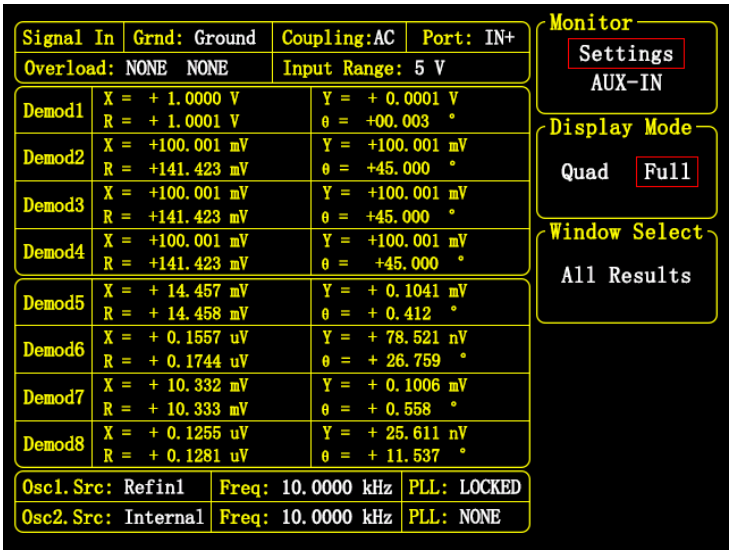


图 64. <Full> 显示模式

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

  在 <Display Mode> 设置为 <Quad> 时，可启用此 2 项配置项。<Window Select> 选择第几个分栏窗口，<Window 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 65 所示，在 Numeric 选项卡可选择任意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，选择 Plotter 选项卡，可以选择一个或者多个输出结果进行波形观察。

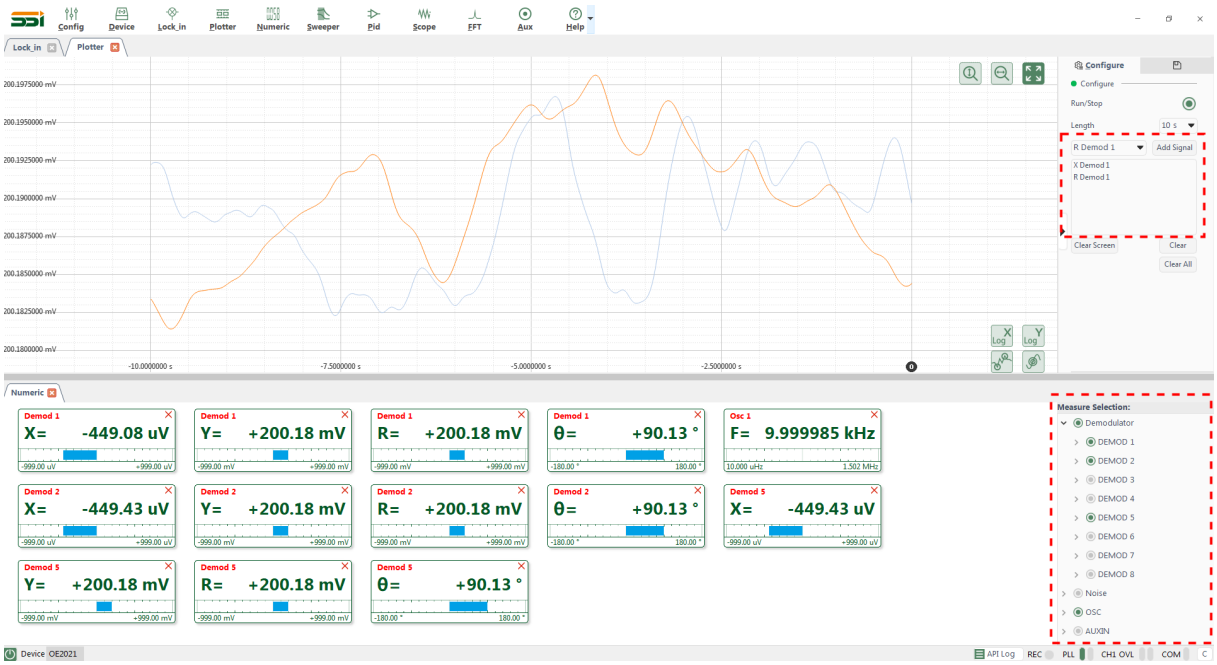


图 65. 上位机 [DISPLAY] 相关设置

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 66 右边栏所示：

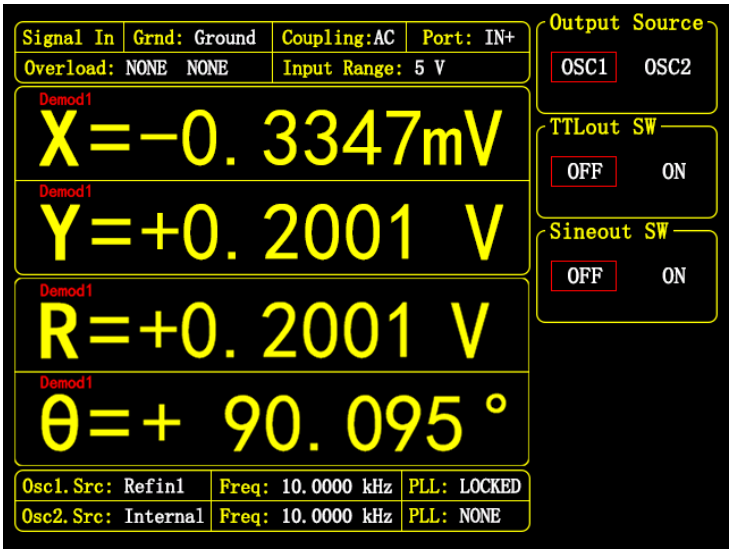


图 66. [SIGNAL OUTPUT] 子菜单

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

OE2011 可通过前面板的“Sine Out”BNC 接头输出幅值由 100 nV_{rms} 到 5 V_{rms} 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 0 V。
  <ON> ：打开 TTLout 输出，此时 TTLout 输出 3.3 V TTL 方波信号。

- <Sineout SW>：SINE OUT 接口的输出模式设置
  <OFF> ：关闭 Sineout 输出，此时 Sineout 恒定输出 0 V。
  <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 67 所示。
  在一极其微弱的信号测量（如电阻热噪声测量、微小阻抗测量等）情况下，建议关闭 Sineout 和 TTLout 的输出，降低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 μV_{rms} ~ 5 V_{rms} 有效值，最小分辨率为 0.1 μV_{rms}。

- <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 −5~5 V_{DC}，最小分辨率为 0.001 V_{DC}。

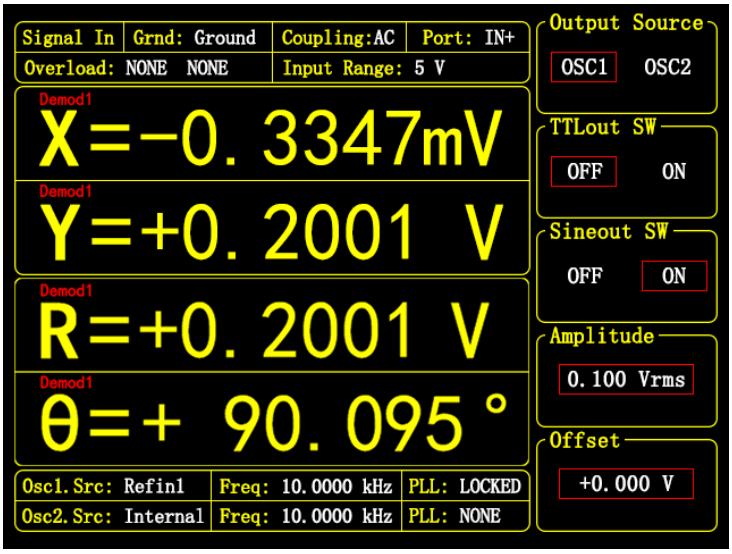


图 67. <Sineout SW> 打开时菜单

5.6.2. 上位机配置

如图 68 上位机的红框所示配置区域为 [SIGNAL OUTPUT] 的配置区域，用户可以在参数表或者流程框图区域设置信号输出通道的相关配置，<Output Source>、<TTLout SW>、<Sineout SW>、<Amplitude> 和 <Offset> 的配置信息均可在红框里修改确认。

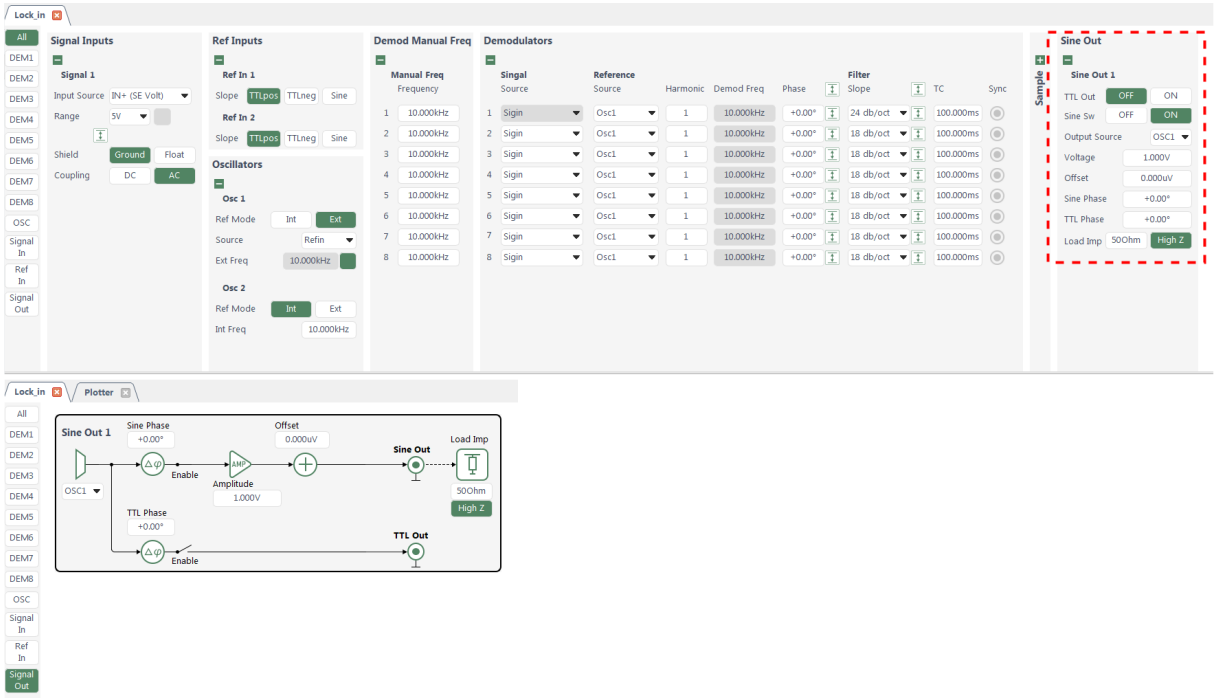


图 68. [SIGNAL OUTPUT] 的配置区域

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 中的 4 种自动设置。如图 69 右边栏所示：

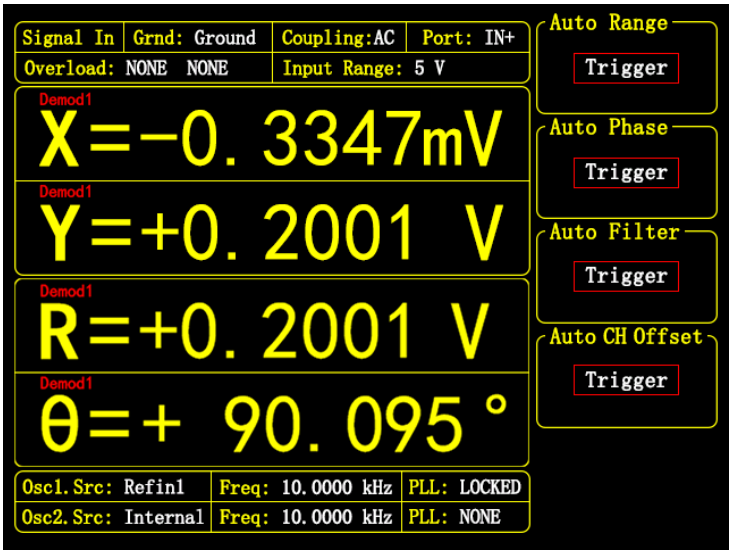


图 69. AUTO SET 子菜单

- <Auto Range>：自动量程设置功能

  按下 <Auto Range> 按钮后，仪器将根据当前输入信号的幅值自动调整 <Input Range> 设置。

  自动量程选择从 <5 V> 档位开始，逐级向下切换至更低量程，直至所选档位能够容纳信号的最大幅值且不发生溢出为止。此时，仪器将保持当前的量程。

- <Auto Phase>：自动相位补偿功能

按下 <Auto Phase> 按钮后，仪器会自动调整所有解调器的 <Ref.Phase>，使测得的输入信号相位为 0°。该过程需要一定的响应时间（一般小于 5 秒），若当前信号的相位值波动较大时，<Auto Phase> 设置可能失败。此情况下请切换至 [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

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

参考频率大于 100 Hz 时，Time Constant = 100 ÷ Frequency, Filter = 24 dB/oct。

参考频率小于 100 Hz 时，Time Constant = 1 s, Filter = 24 dB/oct, Sync Filter = ON。

参考频率小于 1 Hz 时，Time Constant = 1 ÷ Frequency, Filter = 24 dB/oct, Sync Filter = ON。

例如：若解调器 1 的参考频率是 10 kHz，按下 <Auto Filter> 后，解调器 1 的滤波器时间常数变为 10 ms，滤波器陡降斜率设为 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，仪器会自动调整 [CH OUT] 菜单中的 <Offset> 参数，使当前 2 个 CHOUT 通道的输出公式计算结果归零，实现直流偏置的自动补偿。

5.7.2. 上位机配置

如图 70 上位机的红框所示配置区域为 [AUTO SET] 的配置区域，分布于对应设置的右侧，用户可根据实际需要点击对应的 “ ” 图标进行自动配置。

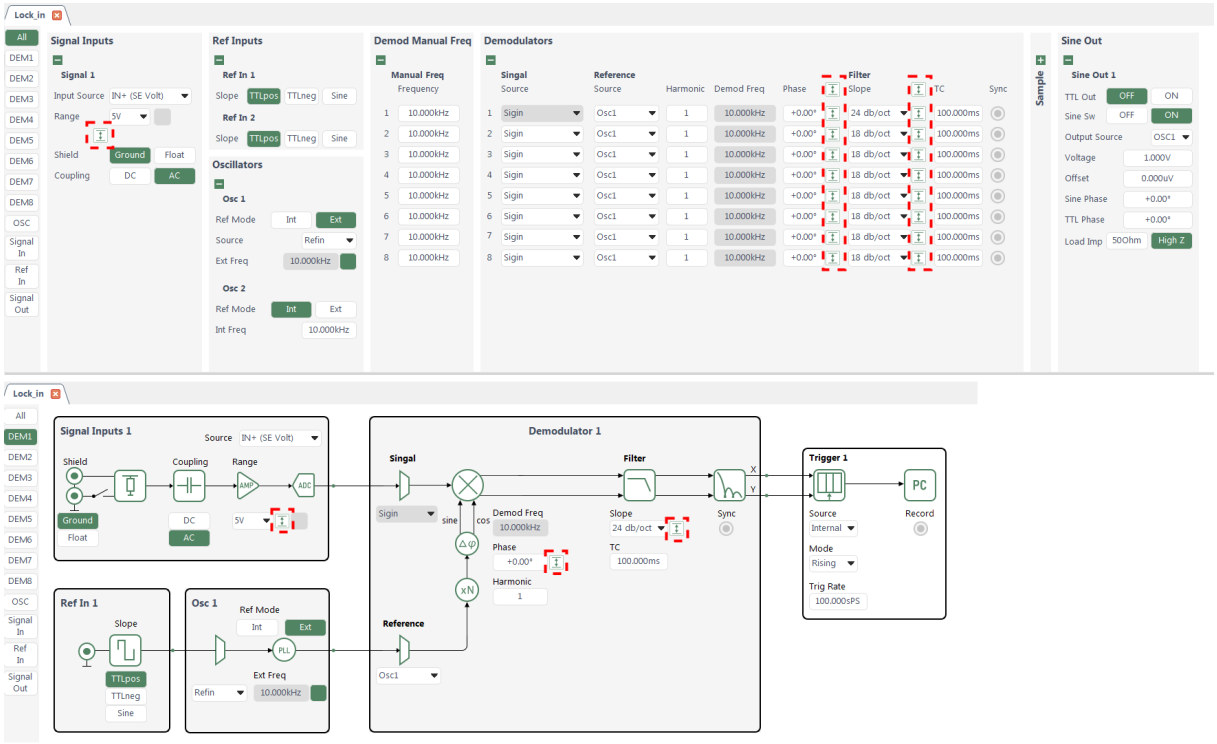


图 70. [AUTO SET] 的配置区域

5.8 [CHANNEL OUTPUT] 与 [AUX OUTPUT] 子菜单

5.8.1. 前面板界面配置

通过前面板的 MENU 菜单栏选择 [CHANNEL OUTPUT] 或者 [AUX OUTPUT] 子菜单进入，如图 71 和 72 右边栏所示。鉴于这两个子菜单的功能配置项及界面布局完全一致，本节将对二者进行统一介绍。

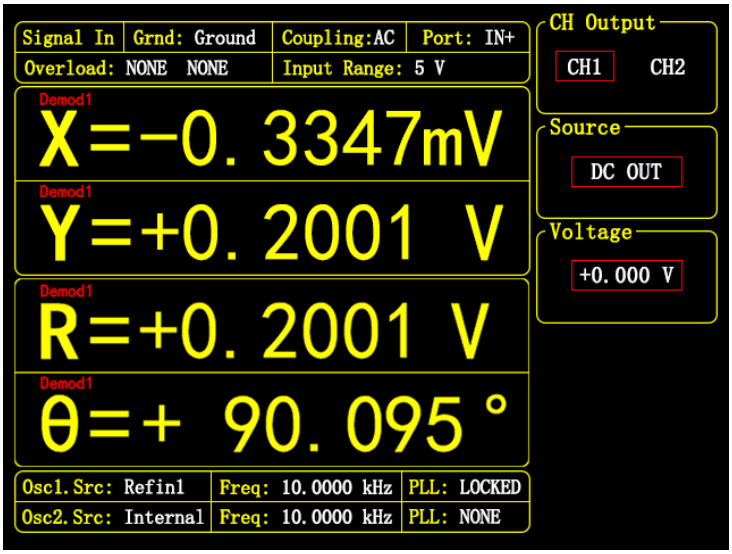


图 71. [CHANNEL OUTPUT] 子菜单

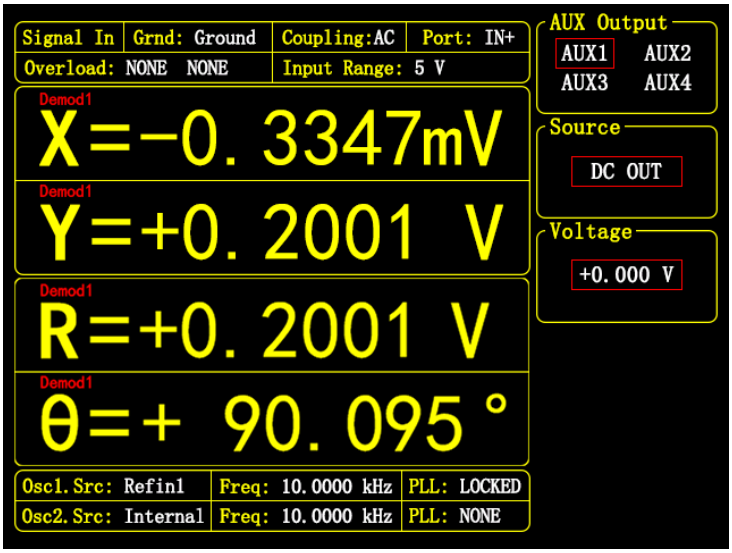


图 72. [AUX OUTPUT] 子菜单

[CHANNEL OUTPUT] 和 [AUX OUTPUT] 子菜单控制后面板上 CHOUT / AUXOUT 的 6 个 BNC 通道，可以输出用户设定的任意值、解调器的 R、X、Y 和 θ 值等，以及通过 <Sensitivity> 设置比例系数，<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:

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

除了上面两种情况，还有下面选项:

a) AUXOUT：按照用户设定的电压值输出，范围是 −10~10 V_{DC}，分辨率为 1 mV。

b) AUXIN1 ~ AUXIN4：输出等于 AUXIN 接口的输入电压。

- <CH Output> / <AUX Output>：CH 通道或 AUX 通道的选择设置
  分别选择 CH1 ~ CH2 和 AUX1 ~ AUX4 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>：固定直流输出模式的输出电压值

在 <Source> 设置为 <DC OUT> 时，可设置 <Voltage>，如图 71 和 72 所示。可通过数字键盘输入电压值，设置范围是 −10~10 V_{DC}，分辨率为 1 mV。

- <Sensitivity>：灵敏度设置

当 <Source> 选择除 <AUXOUT> 和 <AUXIN1 ~ 4> 以外的其它输入源时，会出现 <Sensitivity>、<Offset> 和 <Expand> 的选项菜单界面如图 73 所示。

其中 <Sensitivity> 灵敏度可选择的范围如表 5 所示，注意，当 <Source> 设置为 Demod1–Demod8 的 <θ> 时，<Sensitivity> 设置无效，固定为 180°。

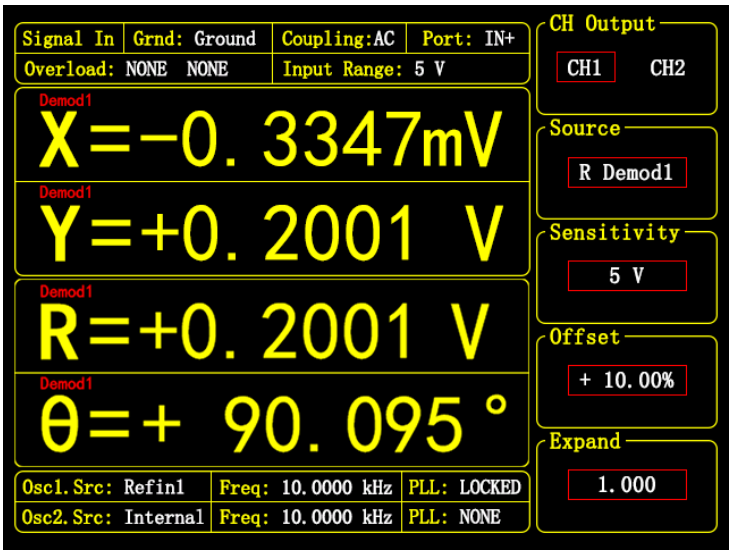


图 73. <Offset&Expand> 界面

表 5. 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 0.001~10 000 的实数，默认值为 1。但 Expand 的设置使得计算超出了 ±10 V 的时候，输出值将会维持在 ±10 V。

☆**注：每一个 CH / AUX 通道都有一个独立的偏置值和放大值。**假如设置了 CH1 的 <Offset> 等于 50% 和 <Expand> 等于 3，那只有 CH1 通道输出会受影响，其他通道的输出不变。

☆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 74 所示配置区域为 [CHOUT AUXOUT] 的配置区域，可通过 Aux 选项卡打开此功能，<Source>、<Voltage>、<Sensitivity>、<Expand> 和 <Offset> 的配置信息均可在此配置区内修改确认。

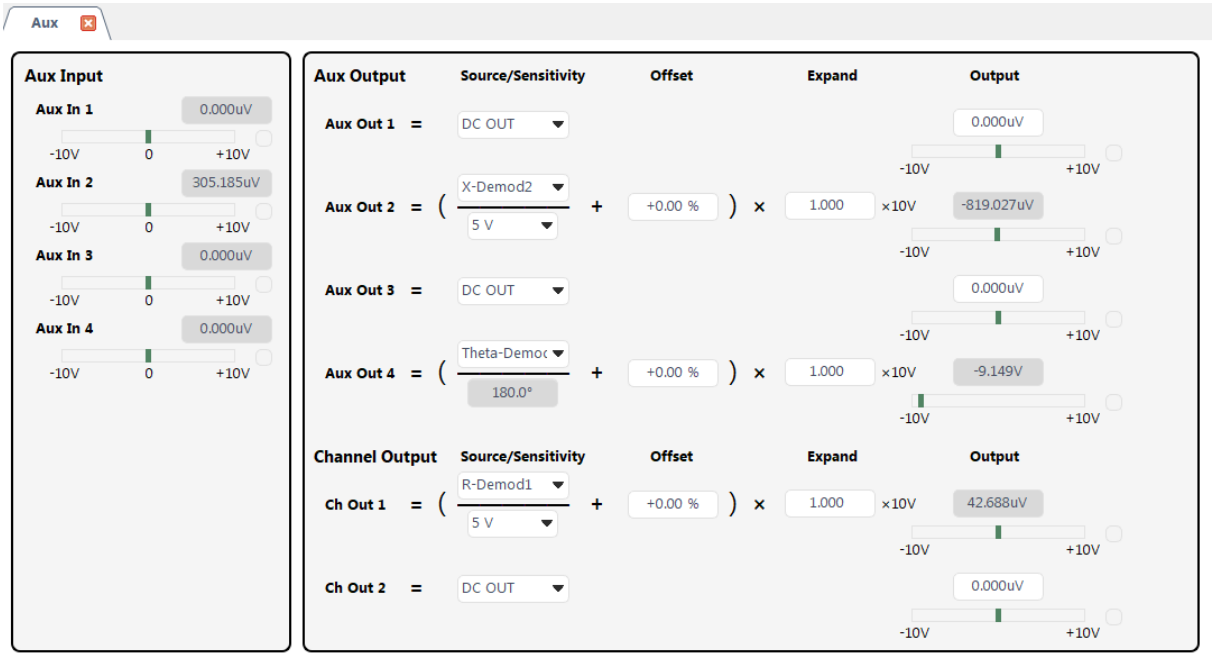


图 74. [CHOUT AUXOUT] 的配置区域

5.9 [SYSTEM] 子菜单

5.9.1. 前面板界面配置

[SYSTEM] 子菜单包括 OE2011 中的系统信息与系统设置。如仪器信息，屏幕亮度，通讯设置等。如图 75 右边栏所示：

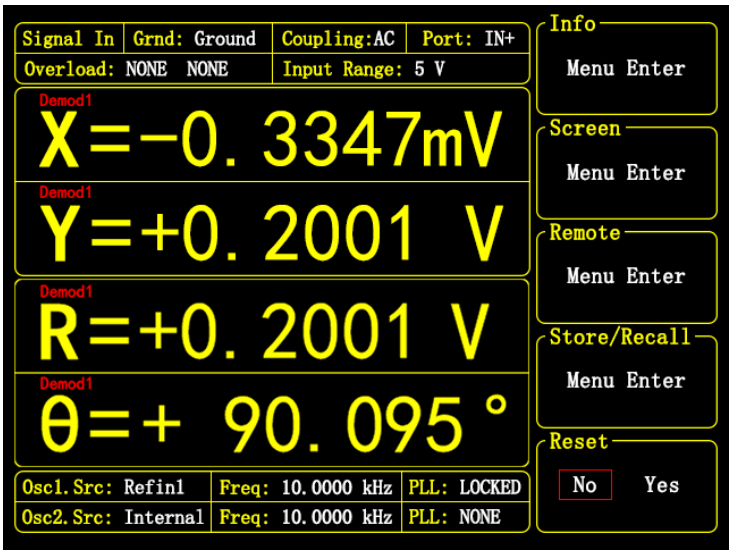


图 75. [SYSTEM] 子菜单

- <Info> 二级子菜单

<Info> ：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 76 所示。其中序列号应与后面板的出厂标签上一致。

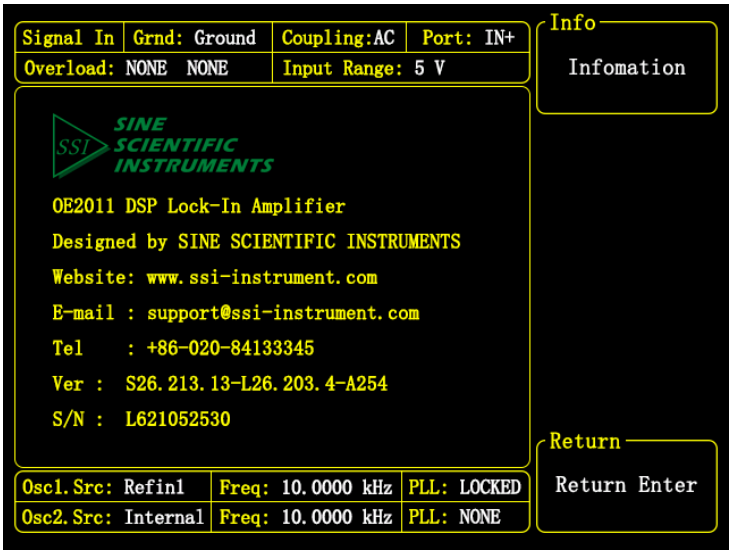


图 76. <INFO>-仪器信息

- <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 77 所示：

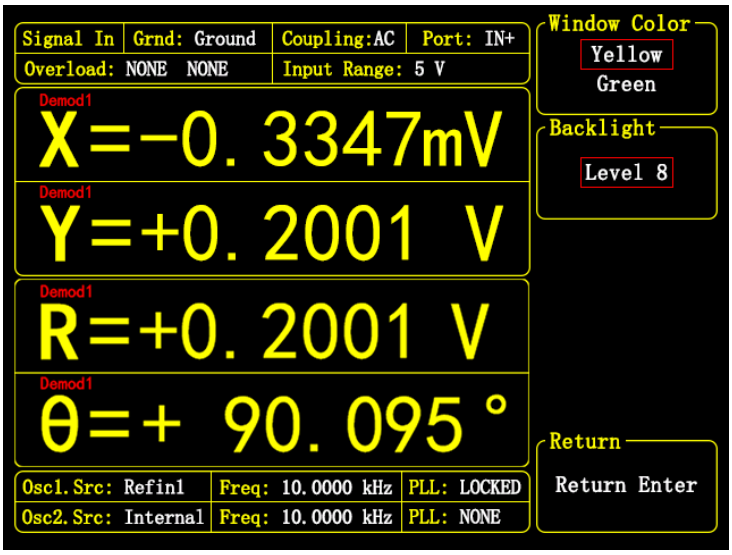


图 77. <Screen> 子菜单-<Yellow> 风格

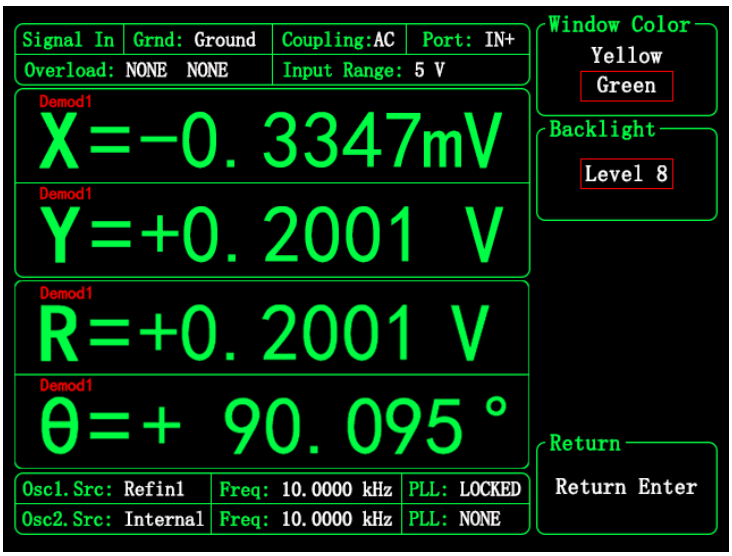


图 78. <Screen> 子菜单-<Green> 风格

<Window Color>：界面色调设置

<Yellow>：界面主色调为黄色风格，如图 77 所示。

<Green>：界面主色调为绿色风格，如图 78 所示。

☆ **注：目前仅提供黄色风格界面，绿色风格请等待后续 OTA 升级。**

<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 79 所示。

OE2011 有四种远程通讯接口，RS232 串口、GPIB 接口、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。

本菜单仅用于修改各个远程通讯接口的配置，在 <Remote Mode> 中选中哪个通讯接口，并不会影响其他接口的通讯，仪器支持多个通讯接口同时使用。

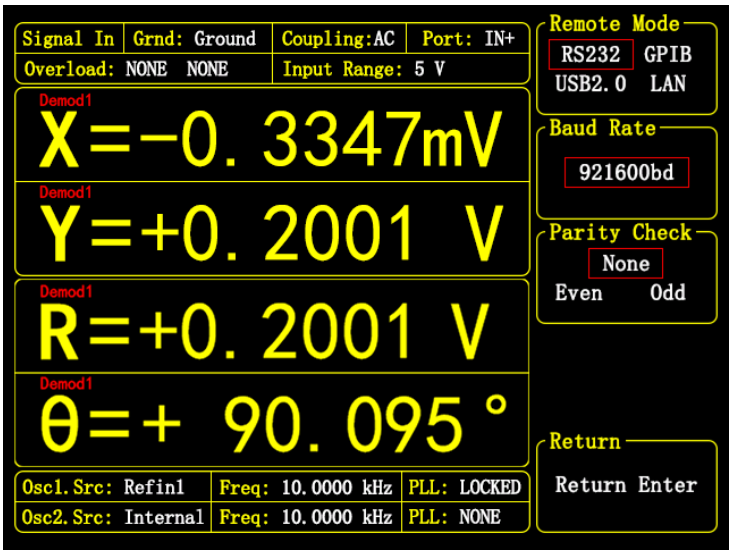


图 79. <Remote> 子菜单-<RS232> 选项

- <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 79 所示。

  <GPIB> ：GPIB 母接口。其地址配置界面如图 80 所示。

  <USB2.0> ：USB2.0 高速通讯接口。配置界面如图 81 所示。

  <Ethernet>：1000Mbps 以太网接口。其中端口号为 10001，假设 OE2011 获取到的网络 IP 地址为 192.168.1.10，则电脑端连接 OE2011 的 IP 地址为 192.168.1.10:10001。配置界面图 82 如所示。

  仪器配套的上位机远程控制软件必须以 USB2.0 或者 Ethernet 接口通讯，暂不支持 RS232 接口。

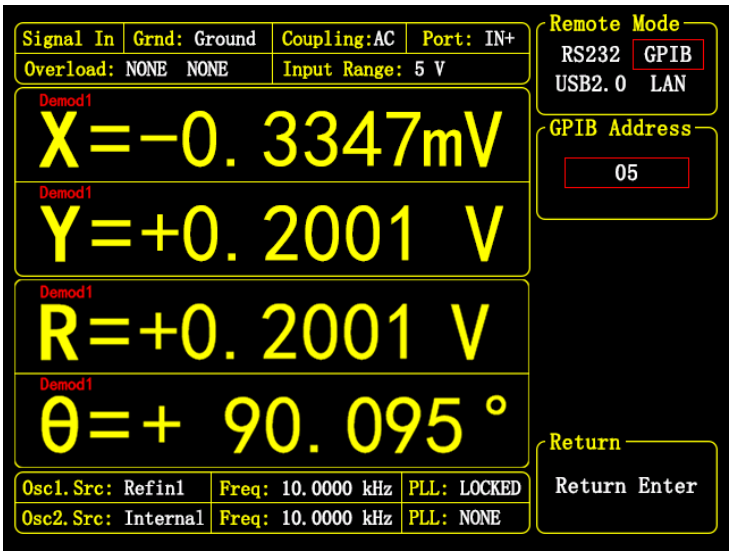


图 80. <Remote> 子菜单-<GPIB> 选项

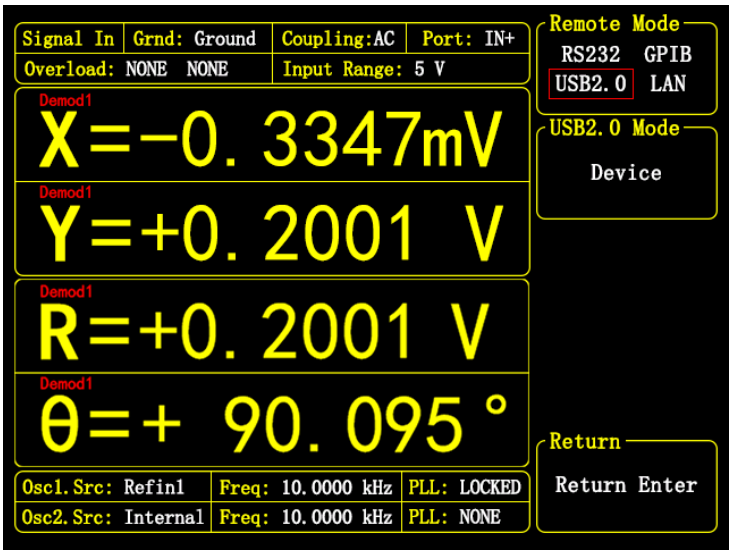


图 81. <Remote> 子菜单-<USB2.0> 选项

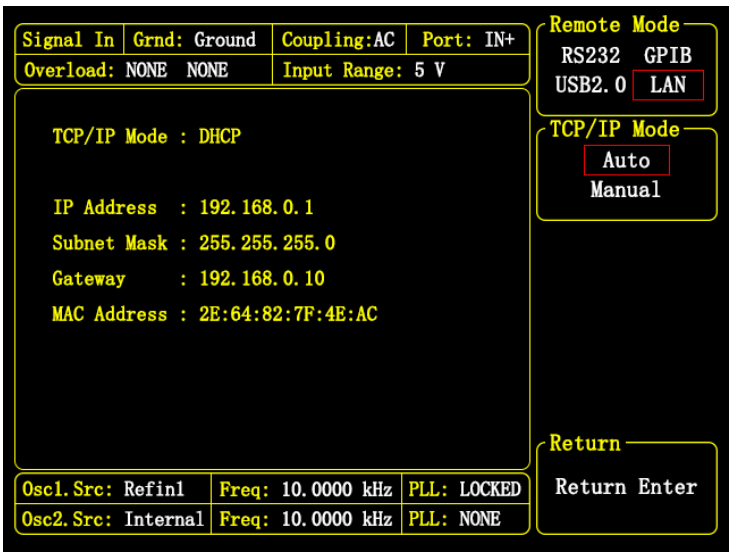


图 82. <Remote> 子菜单-<Ethernet> 选项

- <Baud Rate>：波特率设置

  在 <RS232> 模式下可启用本配置项。可通过旋钮调节波特率，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> 模式下可启用本配置项。

  <Even> ：偶校验

  <ODD> ：奇校验

  <NONE> ：无校验

- <GPIB Address>：GPIB 地址设置

  在 <GPIB> 模式下可启用本配置项。可通过旋钮调节本设备的 GPIB 地址，数值可设置为：<1> 至 <30>，默认为 <5>。

- <TCP/IP Mode>：以太网 TCP/IP 模式设置

在 <Ethernet> 模式下可启用本配置项。一般情况下，当仪器通过网线接入路由器后，用 <Auto> 模式就可以自动连接上以太网。

<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 83 的状态“Connecting...”，表示正在连接当前网络。当连接网络成功时，如图 84 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 85 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 86 所示，最后按 <ENTER> 确认。

当配置完成后，即可在局域网内对 OE2011 进行配置和读取数据。

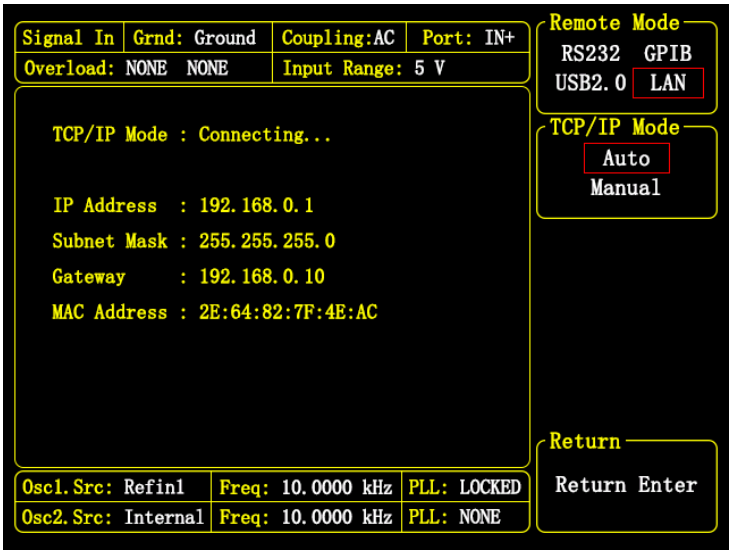


图 83. <Auto> 模式—Connecting

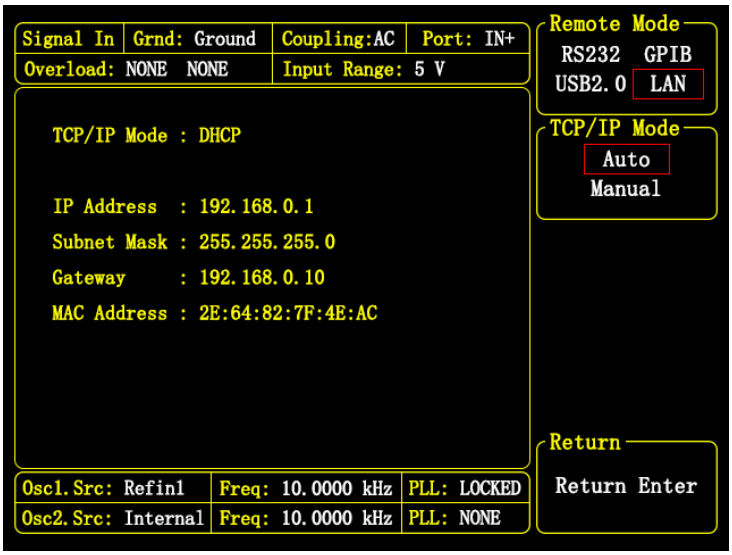


图 84. <Auto> 模式—连接成功

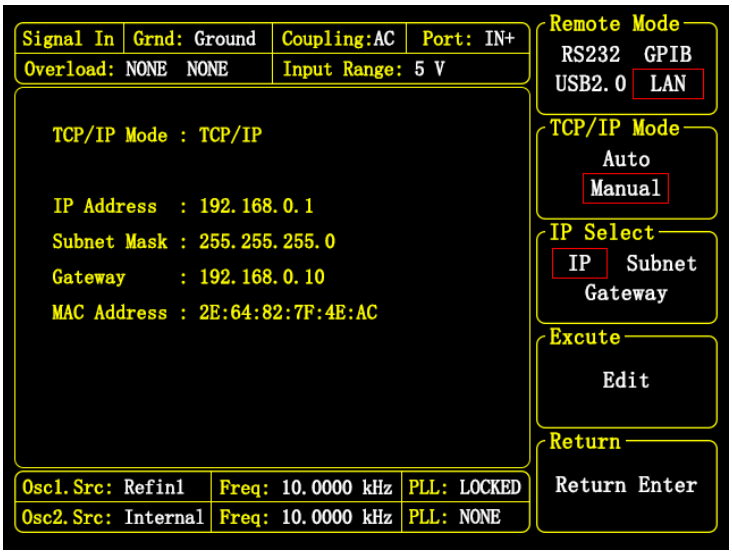


图 85. <Manual> 模式

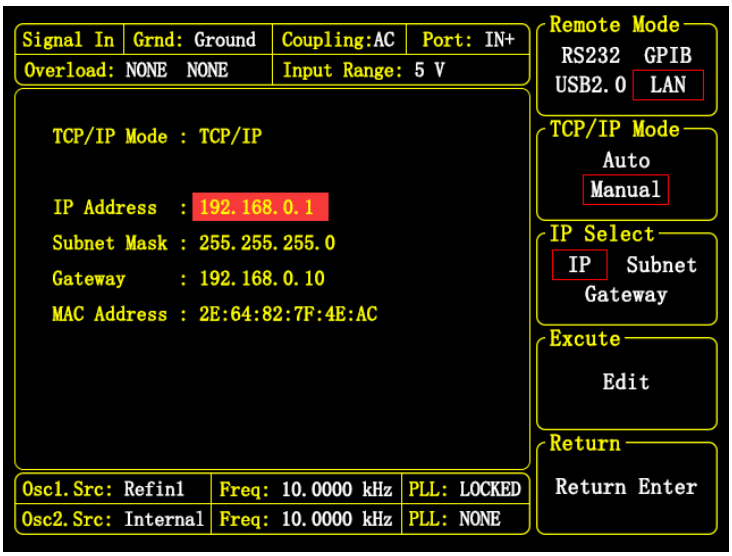


图 86. <Manual> 模式修改中

- <Store/Recall>：二级子菜单

选择 <Store/Recall> 二级子菜单进入，如图 87 右边栏所示。<Store/Recall> 菜单用于保存（Store）或恢复（Recall）当前仪器的参数设置与运行状态。仪器内置四个独立的配置存储区：<S1>、<S2>、<S3> 和 <S4>。每个存储区可以保存一套完整的参数配置，包括解调器设置、滤波器参数、输出设置等。当需要切换到某个已保存的配置时，只需选择对应的存储区并执行 <Recall> 操作，即可快速加载该配置，极大地提高了实验效率和灵活性。

<Store> ：进入 <Store/Recall> 菜单后，选择 <Store> 模式，在 <Channel> 项中指定目标存储区（例如 <S1>），然后在 <Execute> 项中选择 <Store>，即可将当前所有参数与状态保存至所选存储区。

<Recall> ：要恢复已保存的配置，请选择 <Recall> 模式，在 <Channel> 中选择对应的存储区（如 <S1>），并在 <Execute> 项中执行 <Recall> 操作，仪器将加载该存储区中的全部设置。

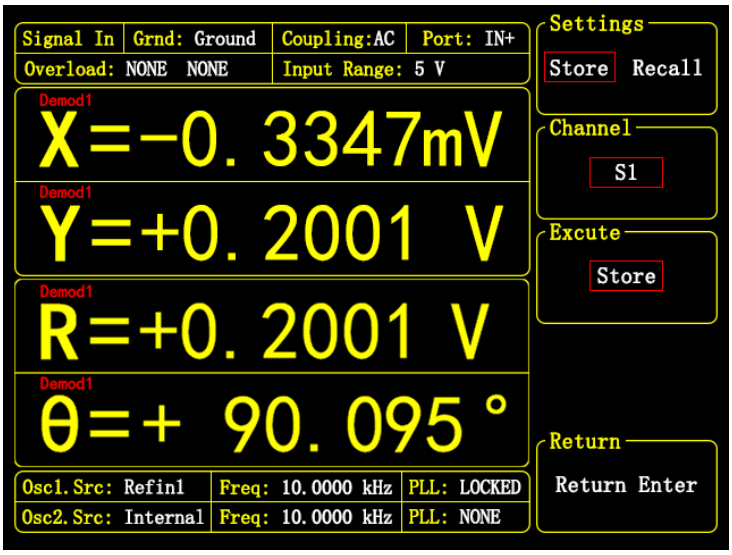


图 87. <Store/Recall> 子菜单

恢复默认配置：

另外在 <Recall> 模式下，<Channel> 还提供 <Default> 选项。选择该选项并执行 <Recall> 后，仪器将恢复为出厂默认配置，所有参数重置为初始状态。如图 88 所示。

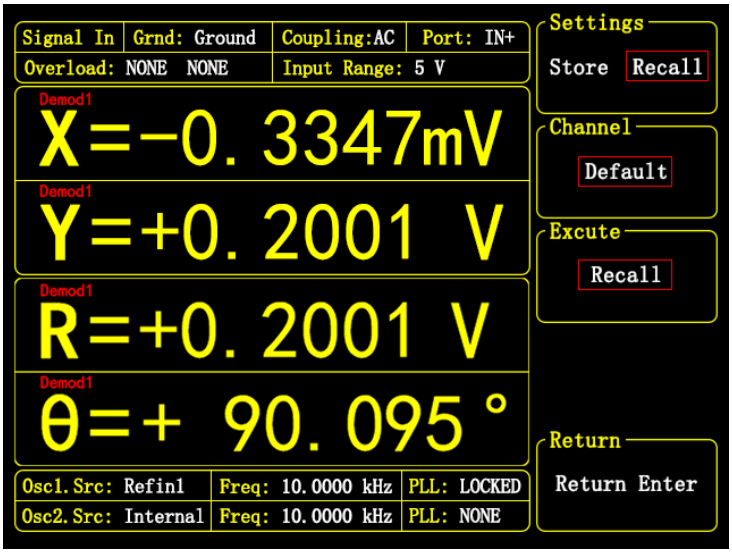


图 88. 恢复默认设置选项

- <Reset>：锁相放大器软复位
  按下对应按钮后，系统会软复位。复位重启后不改变当前设置。

5.9.2. 上位机配置

如图 89 所示配置区域为 [SYSTEM] 的配置区域，可通过 Device 选项卡打开此功能，可在此选项卡中查看仪器的 <Info>，配置查看以太网地址，进行 <Store/Recall> 操作等。

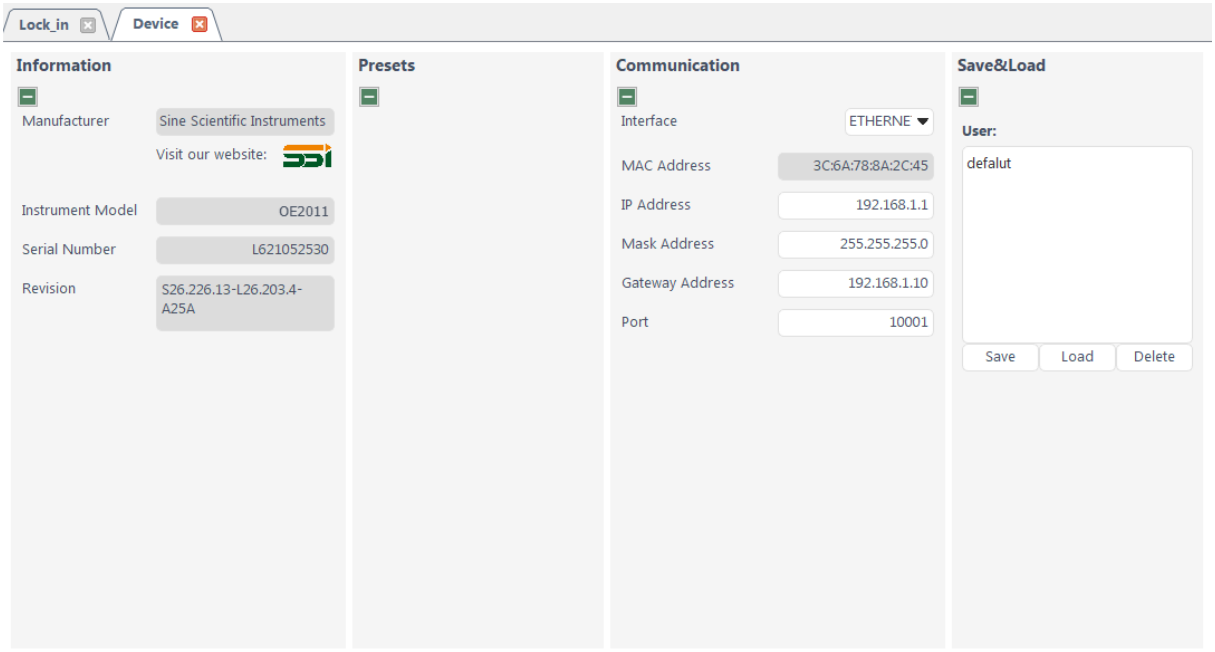


图 89. [SYSTEM] 的配置区域

5.10 上位机数据保存

OE2011 的上位机软件支持数据记录和保存功能，允许用户根据需求选择并保存一段时间内的测量数据。

5.10.1. 全局数据保存

全局数据保存包括以下内容：

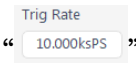
- 解调器 1～8 的测量值 R、X、Y 和 θ 的值；
- 解调器 1 和 5 的 X 和 Y 噪声值；
- 2 个振荡器的测量频率；

全局数据保存的步骤如下：

1、当软件运行时，点击图 90 中红框内“Record”按钮，当按钮呈现选中状态时，表示系统已开始记录当前采集的数据。

2、数据以 Excel 表格的形式保存，文件名为“data_lock_in_XXXXXXXX_XXXXXX.csv”，其中“XXXXXXXX_XXXXXX”代表日期和时间戳，确保每个文件名称唯一。文件默认存储于程序目录下，其数据格式示例如图 91 所示。

3、再次按下“Record”按钮，按钮恢复未选中状态，表示数据采集过程已停止。

4、用户可在“

”中可以修改当前显示和保存数据的采样率，可设置范围为 0.1~50 kSPS。

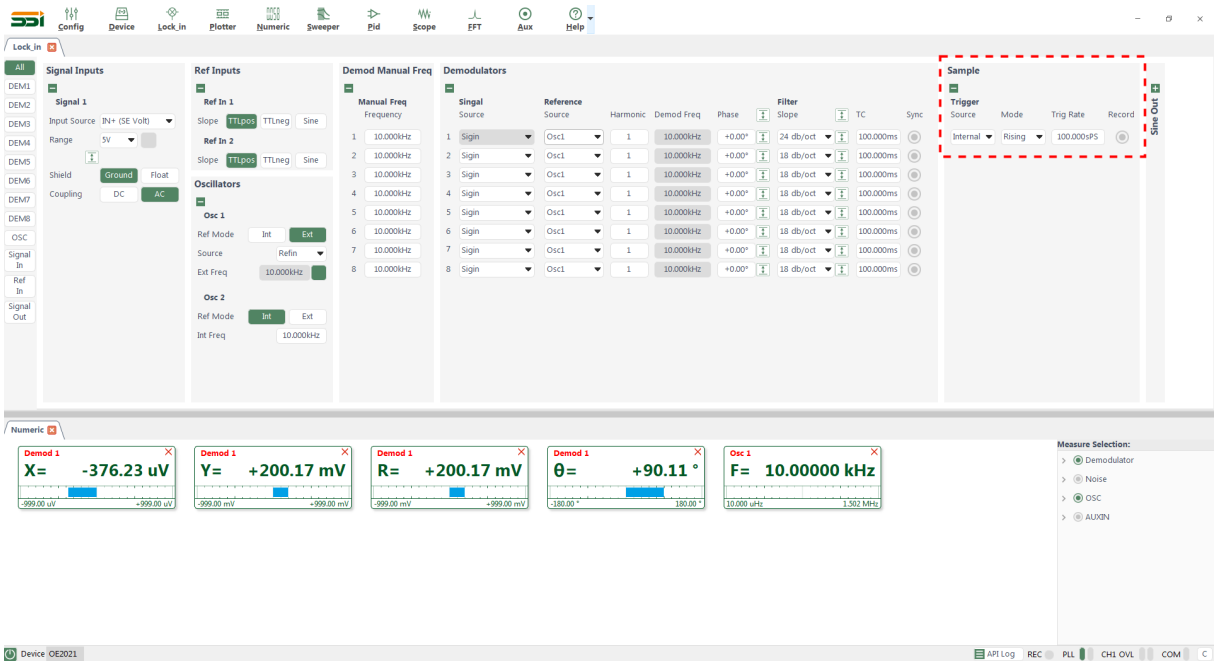


图 90. 数据保存配置区域图

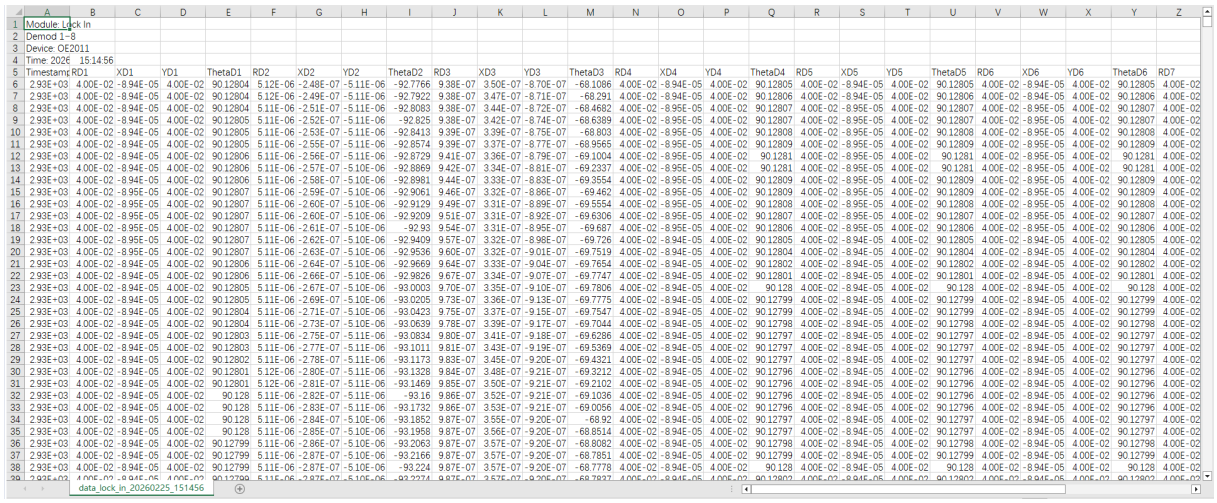


图 91. data_lock_in_XXXXXXXX_XXXXXX.csv 文件格式

5.10.2. Plotter 波形图数据保存

在 Plotter 选项卡中，点击图 92 中红框所示的“Save”按钮区域，再点击“Save Data”按钮，即可将当前波形图所对应的数据保存至本地硬盘。

数据以 Excel 表格的形式保存，文件名为“data_plotter_XXXXXXXX_XXXXXX.csv”，其中“XXXXXXXX_XXXXXX”代表日期和时间戳，确保每个文件名称唯一。文件默认存储于程序目录下，其数据格式示例如图 93 所示。

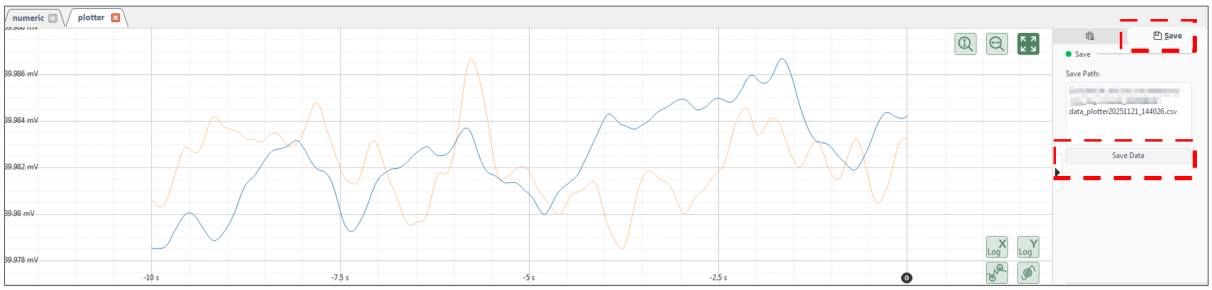


图 92. Plotter 波形图数据保存配置图

	A	B	C	D	E
1	Module: Plotter				
2	Graph	1	2		
3	Device: OE2041				
4	Time: 2025	14:40:26			
5	Timestamp	R Demod 1	Timestamp	Theta Demod 1	
6	1.96E+04	4.00E-02	1.96E+04	-1.41E-01	
7	1.96E+04	4.00E-02	1.96E+04	-1.41E-01	
8	1.96E+04	4.00E-02	1.96E+04	-1.41E-01	
9	1.96E+04	4.00E-02	1.96E+04	-1.41E-01	
10	1.96E+04	4.00E-02	1.96E+04	-1.41E-01	
11	1.96E+04	4.00E-02	1.96E+04	-1.41E-01	
12	1.96E+04	4.00E-02	1.96E+04	-1.41E-01	
13	1.96E+04	4.00E-02	1.96E+04	-1.41E-01	
14	1.96E+04	4.00E-02	1.96E+04	-1.41E-01	
15	1.96E+04	4.00E-02	1.96E+04	-1.41E-01	
16	1.96E+04	4.00E-02	1.96E+04	-1.41E-01	
17	1.96E+04	4.00E-02	1.96E+04	-1.41E-01	
18	1.96E+04	4.00E-02	1.96E+04	-1.41E-01	

图 93. Plotter 波形图数据文件格式

5.10.3. Scope 波形图数据保存

在 Scope 选项卡中，点击图 94 中红框所示的“Save”按钮区域，再点击“Save Data”按钮，即可将当前波形图所对应的数据保存至本地硬盘。

数据以 Excel 表格的形式保存，文件名为“data_oscilloscope_XXXXXXXX_XXXXXX.csv”，其中“XXXXXXXX_XXXXXX”代表日期和时间戳，确保每个文件名称唯一。文件默认存储于程序目录下，其数据格式示例如图 95 所示。

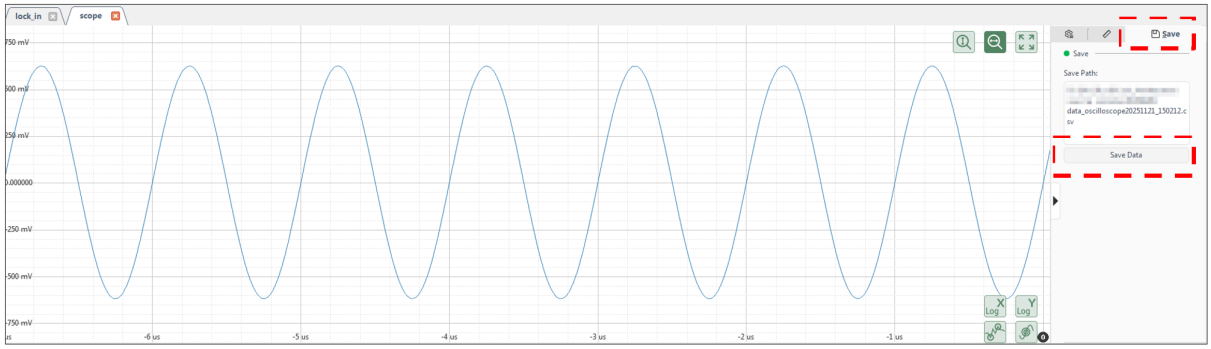


图 94. Scope 波形图数据保存配置图

	A	B
1	Module: Oscilloscope	
2	Osci 1	
3	Device: OE2041	
4	Time: 2025	15:02:12
5	X	Y
6	-6.55E-05	1.37E-01
7	-6.55E-05	1.21E-01
8	-6.55E-05	1.06E-01
9	-6.55E-05	9.14E-02
10	-6.55E-05	7.73E-02
11	-6.55E-05	5.89E-02
12	-6.55E-05	4.29E-02
13	-6.55E-05	2.73E-02
14	-6.55E-05	1.32E-02
15	-6.55E-05	-2.83E-03
16	-6.55E-05	-1.70E-02
17	-6.55E-05	-3.30E-02
18	-6.55E-05	-4.90E-02
19	-6.55E-05	-6.55E-02
20	-6.55E-05	-8.06E-02
21	-6.55E-05	-9.66E-02
22	-6.55E-05	-1.11E-01

图 95. Scope 波形图数据文件格式

5.10.4. Sweeper 波形图数据保存

在 Sweeper 选项卡中，点击图 96 中红框所示的“Save”按钮区域，再点击“Save Data”按钮，即可将当前波形图所对应的数据保存至本地硬盘。

数据以 Excel 表格的形式保存，文件名为“data_sweep_XXXXXXXX_XXXXXX.csv”，其中“XXXXXXXX_XXXXXX”代表日期和时间戳，确保每个文件名称唯一。文件默认存储于程序目录下，其数据格式示例如图 97 所示。

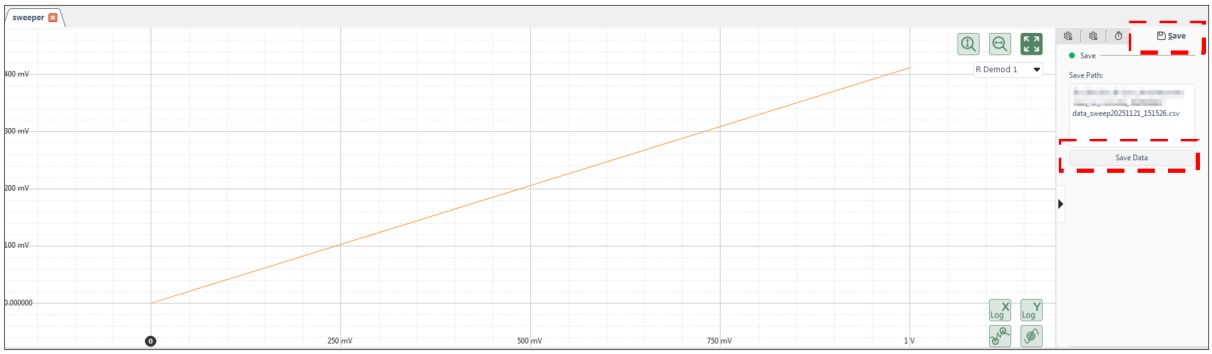


图 96. Sweeper 参数扫描仪数据保存配置区域

	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	AA
1	Module: Sweep																										
2	Sweep 0																										
3	Device: OE2041																										
4	Time: 2025 15:15:26																										
5	Timestamp	Demo_1 R	Demo_1 X	Demo_1 Y	Demo_1 Th	Demo_2 R	Demo_2 X	Demo_2 Y	Demo_2 Th	Demo_3 R	Demo_3 X	Demo_3 Y	Demo_3 Th	Demo_4 R	Demo_4 X	Demo_4 Y	Demo_4 Th	Demo_5 R	Demo_5 X	Demo_5 Y	Demo_5 Th	Demo_6 R	Demo_6 X	Demo_6 Y	Demo_6 Th	Osc Int Fre	Osc Int Freq 2
6	4.164E+09	4.16E-04	-4.29E-05	-4.14E-04	-95.91097	4.16E-04	-4.28E-05	-4.14E-04	-95.9069	4.16E-04	-4.28E-05	-4.14E-04	-95.9069	4.16E-04	-4.28E-05	-4.14E-04	-95.9069	4.16E-04	-4.28E-05	-4.14E-04	-95.9069	4.16E-04	-4.28E-05	-4.14E-04	-95.9069	999999.51	999999.51
7	3.886E+09	4.37E-04	-4.48E-05	-4.35E-04	-95.85548	4.37E-04	-4.48E-05	-4.35E-04	-95.89733	4.37E-04	-4.48E-05	-4.35E-04	-95.89733	4.37E-04	-4.48E-05	-4.35E-04	-95.89733	4.37E-04	-4.48E-05	-4.35E-04	-95.89733	4.37E-04	-4.48E-05	-4.35E-04	-95.89733	999999.51	999999.51
8	693618825	4.59E-04	-4.74E-05	-4.57E-04	-95.92161	4.58E-04	-4.70E-05	-4.56E-04	-95.87884	4.58E-04	-4.70E-05	-4.56E-04	-95.87884	4.58E-04	-4.70E-05	-4.56E-04	-95.87884	4.58E-04	-4.70E-05	-4.56E-04	-95.87884	4.58E-04	-4.70E-05	-4.56E-04	-95.87884	999999.27	999999.27
9	750979896	4.82E-04	-4.94E-05	-4.79E-04	-95.88177	4.82E-04	-4.94E-05	-4.79E-04	-95.88909	4.82E-04	-4.94E-05	-4.79E-04	-95.88909	4.82E-04	-4.94E-05	-4.79E-04	-95.88909	4.82E-04	-4.94E-05	-4.79E-04	-95.88909	4.82E-04	-4.94E-05	-4.79E-04	-95.88909	999999.51	999999.51
10	3.083E+09	5.06E-04	-5.23E-05	-5.03E-04	-95.93328	5.06E-04	-5.19E-05	-5.03E-04	-95.88933	5.06E-04	-5.19E-05	-5.03E-04	-95.88933	5.06E-04	-5.19E-05	-5.03E-04	-95.88933	5.06E-04	-5.19E-05	-5.03E-04	-95.88933	5.06E-04	-5.19E-05	-5.03E-04	-95.88933	999999.51	999999.51
11	484492330	5.30E-04	-5.48E-05	-5.28E-04	-95.93057	5.30E-04	-5.44E-05	-5.27E-04	-95.89732	5.30E-04	-5.44E-05	-5.27E-04	-95.89732	5.30E-04	-5.44E-05	-5.27E-04	-95.89732	5.30E-04	-5.44E-05	-5.27E-04	-95.89732	5.30E-04	-5.44E-05	-5.27E-04	-95.89732	999999.27	999999.27
12	822870507	5.57E-04	-5.66E-05	-5.54E-04	-95.83704	5.57E-04	-5.73E-05	-5.54E-04	-95.90161	5.57E-04	-5.73E-05	-5.54E-04	-95.90161	5.57E-04	-5.73E-05	-5.54E-04	-95.90161	5.57E-04	-5.73E-05	-5.54E-04	-95.90161	5.57E-04	-5.73E-05	-5.54E-04	-95.90161	999999.27	999999.27
13	50432454	5.85E-04	-6.09E-05	-5.81E-04	-95.9819	5.84E-04	-5.97E-05	-5.81E-04	-95.85781	5.84E-04	-5.97E-05	-5.81E-04	-95.85781	5.84E-04	-5.97E-05	-5.81E-04	-95.85781	5.84E-04	-5.97E-05	-5.81E-04	-95.85781	5.84E-04	-5.97E-05	-5.81E-04	-95.85781	999999.51	999999.51
14	2.103E+09	6.14E-04	-6.27E-05	-6.11E-04	-95.85966	6.14E-04	-6.30E-05	-6.10E-04	-95.88979	6.14E-04	-6.30E-05	-6.10E-04	-95.88979	6.14E-04	-6.30E-05	-6.10E-04	-95.88979	6.14E-04	-6.30E-05	-6.10E-04	-95.88979	6.14E-04	-6.30E-05	-6.10E-04	-95.88979	999999.51	999999.51
15	1.751E+09	6.46E-04	-6.59E-05	-6.42E-04	-95.86253	6.45E-04	-6.60E-05	-6.42E-04	-95.87214	6.45E-04	-6.60E-05	-6.42E-04	-95.87214	6.45E-04	-6.60E-05	-6.42E-04	-95.87214	6.45E-04	-6.60E-05	-6.42E-04	-95.87214	6.45E-04	-6.60E-05	-6.42E-04	-95.87214	999999.27	999999.27
16	2.99E+09	6.77E-04	-6.92E-05	-6.74E-04	-95.86549	6.77E-04	-6.91E-05	-6.74E-04	-95.85512	6.77E-04	-6.91E-05	-6.74E-04	-95.85512	6.77E-04	-6.91E-05	-6.74E-04	-95.85512	6.77E-04	-6.91E-05	-6.74E-04	-95.85512	6.77E-04	-6.91E-05	-6.74E-04	-95.85512	999999.51	999999.51
17	2.317E+09	7.11E-04	-7.24E-05	-7.06E-04	-95.84578	7.11E-04	-7.24E-05	-7.07E-04	-95.84656	7.11E-04	-7.24E-05	-7.07E-04	-95.84656	7.11E-04	-7.24E-05	-7.07E-04	-95.84656	7.11E-04	-7.24E-05	-7.07E-04	-95.84656	7.11E-04	-7.24E-05	-7.07E-04	-95.84656	999999.51	999999.51
18	3.991E+09	7.47E-04	-7.65E-05	-7.42E-04	-95.88122	7.47E-04	-7.61E-05	-7.43E-04	-95.85421	7.47E-04	-7.61E-05	-7.42E-04	-95.85421	7.47E-04	-7.61E-05	-7.43E-04	-95.85421	7.47E-04	-7.61E-05	-7.42E-04	-95.85421	7.47E-04	-7.61E-05	-7.43E-04	-95.85421	999999.27	999999.27
19	3.5E+09	7.85E-04	-7.93E-05	-7.81E-04	-95.70868	7.85E-04	-8.01E-05	-7.81E-04	-95.85827	7.85E-04	-8.01E-05	-7.81E-04	-95.85827	7.85E-04	-8.01E-05	-7.81E-04	-95.85827	7.85E-04	-8.01E-05	-7.81E-04	-95.85827	7.85E-04	-8.01E-05	-7.81E-04	-95.85827	999999.51	999999.51
20	1.866E+09	8.23E-04	-8.43E-05	-8.19E-04	-95.87627	8.24E-04	-8.39E-05	-8.19E-04	-95.84428	8.24E-04	-8.39E-05	-8.19E-04	-95.84428	8.24E-04	-8.39E-05	-8.19E-04	-95.84428	8.24E-04	-8.39E-05	-8.19E-04	-95.84428	8.24E-04	-8.39E-05	-8.19E-04	-95.84428	999999.27	999999.51
21	647932839	8.64E-04	-8.84E-05	-8.60E-04	-95.87083	8.64E-04	-8.82E-05	-8.60E-04	-95.85408	8.64E-04	-8.82E-05	-8.60E-04	-95.85408	8.64E-04	-8.82E-05	-8.60E-04	-95.85408	8.64E-04	-8.82E-05	-8.60E-04	-95.85408	8.64E-04	-8.82E-05	-8.60E-04	-95.85408	999999.51	999999.51
22	2.836E+09	9.07E-04	-9.23E-05	-9.03E-04	-95.83571	9.07E-04	-9.26E-05	-9.02E-04	-95.85731	9.07E-04	-9.26E-05	-9.02E-04	-95.85731	9.07E-04	-9.26E-05	-9.02E-04	-95.85731	9.07E-04	-9.26E-05	-9.02E-04	-95.85731	9.07E-04	-9.26E-05	-9.02E-04	-95.85731	999999.51	999999.51
23	3.313E+09	9.52E-04	-9.69E-05	-9.47E-04	-95.84378	9.52E-04	-9.72E-05	-9.47E-04	-95.85643	9.52E-04	-9.72E-05	-9.47E-04	-95.85643	9.52E-04	-9.72E-05	-9.47E-04	-95.85643	9.52E-04	-9.72E-05	-9.47E-04	-95.85643	9.52E-04	-9.72E-05	-9.47E-04	-95.85643	999999.27	999999.27
24	2.092E+09	1.00E-03	-1.01E-04	-9.96E-04	-95.80683	1.00E-03	-1.02E-04	-9.95E-04	-95.84283	1.00E-03	-1.02E-04	-9.95E-04	-95.84283	1.00E-03	-1.02E-04	-9.95E-04	-95.84283	1.00E-03	-1.02E-04	-9.95E-04	-95.84283	1.00E-03	-1.02E-04	-9.95E-04	-95.84283	999999.51	999999.51
25	3.508E+09	1.05E-03	-1.07E-04	-1.05E-03	-95.82552	1.05E-03	-1.07E-04	-1.05E-03	-95.83592	1.05E-03	-1.07E-04	-1.05E-03	-95.83592	1.05E-03	-1.07E-04	-1.05E-03	-95.83592	1.05E-03	-1.07E-04	-1.05E-03	-95.83592	1.05E-03	-1.07E-04	-1.05E-03	-95.83592	999999.51	999999.51
26	3.781E+09	1.10E-03	-1.12E-04	-1.10E-03	-95.8494	1.10E-03	-1.12E-04	-1.10E-03	-95.83068	1.10E-03	-1.12E-04	-1.10E-03	-95.83068	1.10E-03	-1.12E-04	-1.10E-03	-95.83068	1.10E-03	-1.12E-04	-1.10E-03	-95.83068	1.10E-03	-1.12E-04	-1.10E-03	-95.83068	999999.51	999999.51
27	309506995	1.16E-03	-1.18E-04	-1.15E-03	-95.8202	1.16E-03	-1.18E-04	-1.15E-03	-95.82474	1.16E-03	-1.18E-04	-1.15E-03	-95.82474	1.16E-03	-1.18E-04	-1.15E-03	-95.82474	1.16E-03	-1.18E-04	-1.15E-03	-95.82474	1.16E-03	-1.18E-04	-1.15E-03	-95.82474	999999.51	999999.51
28	398442314	1.22E-03	-1.24E-04	-1.21E-03	-95.83949	1.22E-03	-1.24E-04	-1.21E-03	-95.83054	1.22E-03	-1.24E-04	-1.21E-03	-95.83054	1.22E-03	-1.24E-04	-1.21E-03	-95.83054	1.22E-03	-1.24E-04	-1.21E-03	-95.83054	1.22E-03	-1.24E-04	-1.21E-03	-95.83054	999999.27	999999.27

图 97. Sweeper 参数扫描仪数据文件格式

第 6 章 远程编程

6.1 OE2011 命令语法

上位机与 OE2011 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 <;> 或者一个回车符 <cr>。OE2011 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 <;>。在同一命令行发送多个命令的命令响应速度更快。

OE2011 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 允许用户通过命令查询内部设置的当前参数值。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 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，应答将会按顺序轮流返回，每个命令的返回值结尾都跟随一个回车符 <cr> 作为终结符。

对于有多个通道的参数设置，如解调器、振荡器等，需要增加通道数参量来进行识别，通道数从 1 开始计数，例如“FREQ?1”表示查询内部振荡器 OSC1 的频率值，“FREQ1,1000”表示设置内部振荡器 OSC1 的参考信号频率为 1 kHz。而只有一个通道的参数，如输入通道，则不需要增加通道数的参数，例如“ISRC?”表示查询输入通道的单端或者差分模式。

另外，非通道数的参数默认从 0 开始计数。例如“ISRC0”表示输入通道设置为单端模式，“ISRC1”表示输入通道设置为差分模式。

命令格式举例：

FMOD 1,1 <cr>	设置内部振荡器 OSC1 的参考源为内部模式
FREQ 1,10E3 <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
ISRC? <cr>	查询输入通道的单端或者差分模式
IGND 1 <cr>	设置输入接口屏蔽层的接地方式为 GND 模式
OCLK? <cr>	查询时钟输出接口的启动状态

6.2 详细的命令列表

命令语法说明：

- 命令中指定的参数必须严格按照规定顺序书写，各参数之间以英文逗号“ , ”分隔。
- 花括号 { } 内的参数为可选参数，使用时可根据需要选择填写，无需全部填写。
- 仅当命令后带有问号“?”助记符时，该命令才作为查询命令执行；若无“?”，则视为设置命令，不会返回测量或状态数据。
- 通常情况下，发送设置命令时需包含花括号 { } 内所需的参数；而执行查询命令时，不需要包含 { } 中的可选参数。
- 命令名称、助记符与参数之间不得插入空格。下文示例中出现的空格仅为提升可读性，实际通信时应省略。
- 注意：在实际发送命令时，圆括号 ( ) 和花括号 { } 均不得包含在指令字符串中，它们仅用于本文档中对命令结构的说明和标注。

变量定义如下：

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

以上所有的数值变量均可被表示为整数、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

OE2011 只有一个信号输入通道，因此所有输入通道相关指令都不需要添加通道数的参量，直接添加设置参量。

<table>
<tr><td>ISRC (?) {i}</td><td>ISRC 指令用于设置或查询输入信号的接口连接方式。
参数 i=0 时选择 <IN+>(单端电压信号输入)；
i=1 时选择 <DIFF>(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>(直流耦合输入)。</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><th>i</th><th>Input Range</th></tr>
<tr><td>0</td><td>5 V / 5 mA</td></tr>
<tr><td>1</td><td>1 V / 500 µA</td></tr>
<tr><td>2</td><td>200 mV / 50 µA</td></tr>
<tr><td>3</td><td>50 mV / 5 µA</td></tr>
<tr><td>4</td><td>10 mV / 500 nA</td></tr>
<tr><td>5</td><td>2 mV / 50 nA</td></tr>
<tr><td>6</td><td>1 mV / 5 nA</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><th>返回参数</th><th>动态储备</th></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 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=1 时选择振荡器 OSC1，i=2 时选择振荡器 OSC2。

<table>
<tr><td>FMOD (?) i {,j}</td><td>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=1 时选择振荡器 OSC1，i=2 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。</td></tr>
<tr><td>RSRC (?) i {,j}</td><td>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=1 时选择振荡器 OSC1，i=2 时选择振荡器 OSC2。
参数 j 用于选择不同的参考信号源，具体如下：
<table>
<tr><th>j</th><th>参考信号源接口</th></tr>
<tr><td>0</td><td>Ref In</td></tr>
<tr><td>1</td><td>Signal In</td></tr>
<tr><td>2</td><td>Aux In 1</td></tr>
<tr><td>3</td><td>Aux In 2</td></tr>
<tr><td>4</td><td>Aux In 3</td></tr>
<tr><td>5</td><td>Aux In 4</td></tr>
<tr><td>6</td><td>Trig In</td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td>FREQ (?) i {,f}</td><td>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=1 时选择振荡器 OSC1，i=2 时选择振荡器 OSC2。
参数 f 值可设置范围 $1E^{-5}$ ~ $2.5E^{5}$，最小分辨率为 $1E^{-9}$。
指令 FREQ?i 会返回当前的参考信号频率，当振荡器 i 处于内部模式时，返回内部参考模式的信号频率；当振荡器 i 处于外部模式时，返回外部参考源的频率。</td></tr>
<tr><td>FEXT ? i</td><td>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=1 时选择振荡器 OSC1，i=2 时选择振荡器 OSC2。
返回参数类型为浮点数，参数范围在 $1E^{-5}$ ~ $2.5E^{5}$。</td></tr>
<tr><td>FINT (?) i {,f}</td><td>FINT 指令用于设置或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=1 时选择振荡器 OSC1，i=2 时选择振荡器 OSC2。
参数 f 值可设置范围 $1E^{-5}$ ~ $2.5E^{5}$，最小分辨率为 $1E^{-9}$。
指令 FINT?i 会返回当前振荡器的内部模式的设定频率。</td></tr>
<tr><td>RSLP (?) i {,j}</td><td>RSLP 指令用于设置或查询 REF IN 接口的边沿触发方式。
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=1 时选择振荡器 OSC1，i=2 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；
当信号频率低于 1Hz 时，建议使用 TTL 的两种触发方式。</td></tr>
</table>

6.2.3. 解调器配置指令

OE2011 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=1 时选择解调器 Demod1，i=2 时选择解调器 Demod2，i=3 时选择解调器 Demod3…… i=8 时选择解调器 8。

<table>
<tr><td>DSRC (?) i {,j}</td><td>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 对应解调器通道数参量，设置范围是 1～8。
参数 j 用于选择不同的输入信号源，具体如下：
<table>
<tr><th>j</th><th>输入信号源</th></tr>
<tr><td>0</td><td>Signal In</td></tr>
<tr><td>1</td><td>Aux In 1</td></tr>
<tr><td>2</td><td>Aux In 2</td></tr>
<tr><td>3</td><td>Aux In 3</td></tr>
<tr><td>4</td><td>Aux In 4</td></tr>
<tr><td>5</td><td>Demod1 X</td></tr>
<tr><td>6</td><td>Demod1 Y</td></tr>
<tr><td>7</td><td>Demod1 R</td></tr>
<tr><td>8</td><td>Demod1 θ</td></tr>
<tr><td>9</td><td>Demod5 X</td></tr>
<tr><td>10</td><td>Demod5 Y</td></tr>
<tr><td>11</td><td>Demod5 R</td></tr>
<tr><td>12</td><td>Demod5 θ</td></tr>
</table>
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。</td></tr>
<tr><td>OFLT (?) i {,x}</td><td>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 对应解调器通道数参量，设置范围是 1～8。
参数 x 值可设置范围 $1E^{-7}$ ~ 3000，最小分辨率为 $1E^{-7}$。</td></tr>
<tr><td>OFSL (?) i {,j}</td><td>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 对应解调器通道数参量，设置范围是 1～8。
参数 j 用于选择不同陡降，具体如下：
<table>
<tr><th>j</th><th>Filter dB/oct</th></tr>
<tr><td>1</td><td>6 dB/oct</td></tr>
<tr><td>2</td><td>12 dB/oct</td></tr>
<tr><td>3</td><td>18 dB/oct</td></tr>
<tr><td>4</td><td>24 dB/oct</td></tr>
<tr><td>5</td><td>30 dB/oct</td></tr>
<tr><td>6</td><td>36 dB/oct</td></tr>
<tr><td>7</td><td>42 dB/oct</td></tr>
<tr><td>8</td><td>48 dB/oct</td></tr>
</table></td></tr>
</table>

<table>
<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。当解调参考频率低于 250 kHz 时，开启即可生效。
发送该指令时参数 i 必须设置，参数 i 对应解调器通道数参量，设置范围是 1 ~ 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 对应解调器通道数参量，设置范围是 1 ~ 8。
参数 j 用于选择解调器不同的参考基准源，具体如下：
<table>
<tr><th>j</th><th>参考基准源</th></tr>
<tr><td>0</td><td>振荡器 OSC1</td></tr>
<tr><td>1</td><td>振荡器 OSC2</td></tr>
<tr><td>2</td><td>任意频率解调</td></tr>
<tr><td>3</td><td>频率合成 FreqComb1</td></tr>
<tr><td>4</td><td>频率合成 FreqComb2</td></tr>
<tr><td>5</td><td>频率合成 FreqComb3</td></tr>
<tr><td>6</td><td>频率合成 FreqComb4</td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td>DMFR (?) i {, f}</td><td>DMFR 指令用于设置或查询解调器的任意频率解调模式时的参考频率。
发送该指令时参数 i 必须设置，参数 i 对应解调器通道数参量，设置范围是 1 ~ 8。
参数 f 值可设置范围 $1E^{-5}$ ~ $2.5E^{5}$，最小分辨率为 $1E^{-9}$。</td></tr>
<tr><td>HARM (?) i {, j}</td><td>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 对应解调器通道数参量，设置范围是 1 ~ 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 指令将会设置第 i 个解调器的检测参考频率的 j 次谐波的信号。参数 j 必须满足 j*f ≤ 250 kHz。如果 j 次谐波的值大于 250 kHz，那么解调器的输出结果将会出错。</td></tr>
<tr><td>PHAS (?) i ,{x}</td><td>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 对应解调器通道数参量，设置范围是 1 ~ 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 −180.000~180.000，分辨率是 0.001。
例如，发送 PHAS 1,-179.0 这条指令会设置解调器 1 相移值为 −179.000°。而指令 PHAS?1 则是查询解调器 1 的相移值的指令。</td></tr>
<tr><td>DREF ? i</td><td>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 对应解调器通道数参量，设置范围是 1 ~ 8。
返回参数类型为浮点数，参数范围在 $1E^{-5}$ ~ $2.5E^{5}$。返回的频率值 = 参考频率 * 谐波阶数。</td></tr>
</table>

需要特别说明的是，FreqComb 频率合成通道共有 4 个，其与解调器通道相互独立。公式参数设置指令 FCMB 的参数配置较为复杂，具体说明如下表所示：

<table>
<tr>
<td>FCMB (?) i {,x,j,y,k}</td>
<td>
FCMB 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 对应频率合成通道数参量，设置范围是 1～4。
参数 x,j,y,k 对应公式 FreqComb $= A \times F_1 + B \times F_2$ 的 A, F_1, B, F_2 四个参数；
x 和 y 可以设置范围 −10 000~10 000 之间的实数，最小分辨率是 0.001；
j 和 k 可以设置不同的频率源，具体如下：
<table>
<tr><th>j、k</th><th>频率源选择</th></tr>
<tr><td>0</td><td>振荡器 OSC1</td></tr>
<tr><td>1</td><td>振荡器 OSC2</td></tr>
<tr><td>2</td><td>Demod1 的内部任意频率</td></tr>
<tr><td>3</td><td>Demod2 的内部任意频率</td></tr>
<tr><td>4</td><td>Demod3 的内部任意频率</td></tr>
<tr><td>5</td><td>Demod4 的内部任意频率</td></tr>
<tr><td>6</td><td>Demod5 的内部任意频率</td></tr>
<tr><td>7</td><td>Demod6 的内部任意频率</td></tr>
<tr><td>8</td><td>Demod7 的内部任意频率</td></tr>
<tr><td>9</td><td>Demod8 的内部任意频率</td></tr>
</table>
</td>
</tr>
</table>

6.2.4. 信号输出通道配置指令

OE2011 只有一个信号输出通道，因此所有信号输出通道相关指令都不需要添加通道数的参量，直接添加配置参量即可。

SSRC (?) {i}	SSRC 指令用于设置或查询 <Sineout> 接口的频率基准源。 参数 i=0 时频率基准源来自振荡器 OSC1; i=1 时频率基准源来自振荡器 OSC2。
STTL (?) {i}	STTL 指令用于设置或查询 <TTL Out> 接口的输出状态。 参数 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。 参数 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（实数，单位：Vrms，单位不用输入)。参数 x 必须满足 0.1 μV_{rms} ≤ x ≤ 5 V_{rms}，最小分辨率为 0.1 μV_{rms}。
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（实数，单位：V，单位不用输入)。参数 x 范围在 −5~5，最小分辨率为 0.001。
SPHS (?) {x}	SPHS 指令用于设置或查询 <Sineout> 的正弦波相对于振荡器基准的相移。 参数 x 是指相位值（实数，单位为 °，单位不需要输入)，输入范围是 −180~180，最小分辨率是 0.001。
TPHS (?) {x}	TPHS 指令用于设置或查询 <TTLout> 的波形相对于振荡器基准的相移。 参数 x 是指相位值（实数，单位为 °，单位不需要输入)，输入范围是 −180~180，最小分辨率是 0.001。
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。
SMFR (?) {f}	SMFR 指令用于设置或查询 <Sineout> 调制模式的内部频率。 参数 f 值可设置范围是 $1E^{-5}$ ~ $2.5E^{5}$，最小分辨率是 $1E^{-9}$。

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 SMFR 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 的实数，表示调制信号与载波信号的幅值的百分比例，例如设置 AMDP1 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； i=2 时选择调制模式的内部频率，即 SMFR 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 $1E^{-5}$ ~ $2.5E^{5}$，最小分辨率为 $1E^{-9}$。
PMSR (?) {i}	PMSR 指令用于设置或查询 PM 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 SMFR 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（实数，单位为 °，单位不需要输入），输入范围是 0~360，最小分辨率是 0.001。

6.2.5. 通道输出指令

OE2011 拥有 2 个辅助通道 CHOUT 接口和 4 个辅助通道 AUXOUT 接口，所有通道输出的相关指令都需要增加 CH/AUX 通道的选择参数。

首先介绍 CHOUT 的相关指令，下述指令的 CH 通道的参量用 i 表示，i=1 时选择通道 1，i=2 时选择通道 2。

<table>
<tr><td>CHDC(?) i {, x}</td><td>CHDC 指令用于设置或查询 CHOUT 通道的 DC OUT 直流模式的电压值。
参数 i 对应 CH 的通道，i=1 时选择 CH1; i=2 时选择 CH2。
参数 x 用于设置输出的电压值（实数，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 CHDC1,5.00，会设置 <CHOUT1> 的 DC OUT 直流模式的输出值为 5.00 V。</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=1 时选择 CH1; i=2 时选择 CH2。
参数 j 用于选择不同的量程。
具体如下：
<table>
<tr><th>j</th><th>sensitivity</th><th>j</th><th>sensitivity</th></tr>
<tr><td>0</td><td>1 nV/pA</td><td>15</td><td>100 µV/nA</td></tr>
<tr><td>1</td><td>2 nV/pA</td><td>16</td><td>200 µV/nA</td></tr>
<tr><td>2</td><td>5 nV/pA</td><td>17</td><td>500 µV/nA</td></tr>
<tr><td>3</td><td>10 nV/pA</td><td>18</td><td>1 mV/µA</td></tr>
<tr><td>4</td><td>20 nV/pA</td><td>19</td><td>2 mV/µA</td></tr>
<tr><td>5</td><td>50 nV/pA</td><td>20</td><td>5 mV/µA</td></tr>
<tr><td>6</td><td>100 nV/pA</td><td>21</td><td>10 mV/µA</td></tr>
<tr><td>7</td><td>200 nV/pA</td><td>22</td><td>20 mV/µA</td></tr>
<tr><td>8</td><td>500 nV/pA</td><td>23</td><td>50 mV/µA</td></tr>
<tr><td>9</td><td>1 µV/nA</td><td>24</td><td>100 mV/µA</td></tr>
<tr><td>10</td><td>2 µV/nA</td><td>25</td><td>200 mV/µA</td></tr>
<tr><td>11</td><td>5 µV/nA</td><td>26</td><td>500 mV/µA</td></tr>
<tr><td>12</td><td>10 µV/nA</td><td>27</td><td>1 V/mA</td></tr>
<tr><td>13</td><td>20 µV/nA</td><td>28</td><td>2 V/mA</td></tr>
<tr><td>14</td><td>50 µV/nA</td><td>29</td><td>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=1 时选择 CH1; i=2 时选择 CH2。
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}
OEXP (?) 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。CEXP 和 OEXP 指令功能相同且兼容。
参数 i 对应 CH 的通道，i=1 时选择 CH1; i=2 时选择 CH2。
参数 x 用于设置输出放大倍数，范围是 0.001 ≤ x ≤ 10000 的实数，最小分辨率是 0.001。</td></tr>
</table>

COUT (?) i {, j}
FOUT (?) i {, j}

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

COUT 和 FOUT 指令功能相同且兼容。

发送该指令时参数 i 必须设置，i=1 时选择 CH1；i=2 时选择 CH2。

参数 j 用于选择输出值的类型，具体如下：

j	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

然后介绍 AUXOUT 的相关指令，下述指令的 AUX 通道的参量用 i 表示，i=1 时选择通道 1，i=2 时选择通道 2，i=3 时选择通道 3，i=4 时选择通道 4。

<table>
<tr><td>AXDC(?) i {, x}</td><td>AXDC 指令用于设置或查询 AUXOUT 通道的 DC OUT 直流模式的电压值。
参数 i 对应 AUX 的通道参量，设置范围是 1～4。
参数 x 用于设置输出的电压值（实数，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 AXDC1,5.00，会设置 <AXOUT1> 的 DC OUT 直流模式的输出值为 5.00 V。</td></tr>
<tr><td>AXSN (?) i {,j}</td><td>AXSN 指令用于设置或查询 AUXOUT 通道的灵敏度 <sensitivity>。
参数 i 对应 AUX 的通道参量，设置范围是 1～4。
参数 j 用于选择不同的量程。
具体如下：
<table>
<tr><th>j</th><th>sensitivity</th><th>j</th><th>sensitivity</th></tr>
<tr><td>0</td><td>1 nV/pA</td><td>15</td><td>100 μV/nA</td></tr>
<tr><td>1</td><td>2 nV/pA</td><td>16</td><td>200 μV/nA</td></tr>
<tr><td>2</td><td>5 nV/pA</td><td>17</td><td>500 μV/nA</td></tr>
<tr><td>3</td><td>10 nV/pA</td><td>18</td><td>1 mV/μA</td></tr>
<tr><td>4</td><td>20 nV/pA</td><td>19</td><td>2 mV/μA</td></tr>
<tr><td>5</td><td>50 nV/pA</td><td>20</td><td>5 mV/μA</td></tr>
<tr><td>6</td><td>100 nV/pA</td><td>21</td><td>10 mV/μA</td></tr>
<tr><td>7</td><td>200 nV/pA</td><td>22</td><td>20 mV/μA</td></tr>
<tr><td>8</td><td>500 nV/pA</td><td>23</td><td>50 mV/μA</td></tr>
<tr><td>9</td><td>1 μV/nA</td><td>24</td><td>100 mV/μA</td></tr>
<tr><td>10</td><td>2 μV/nA</td><td>25</td><td>200 mV/μA</td></tr>
<tr><td>11</td><td>5 μV/nA</td><td>26</td><td>500 mV/μA</td></tr>
<tr><td>12</td><td>10 μV/nA</td><td>27</td><td>1 V/mA</td></tr>
<tr><td>13</td><td>20 μV/nA</td><td>28</td><td>2 V/mA</td></tr>
<tr><td>14</td><td>50 μV/nA</td><td>29</td><td>5 V/mA</td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td>AXOF (?) i {, x}</td><td>AXOF 指令用于设置或查询 AUXOUT 通道输出的偏置值。
参数 i 对应 AUX 的通道参量，设置范围是 1～4。
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>AXEX (?) i {,x}</td><td>AXEX 指令用于设置或查询 AUXOUT 通道输出的放大倍数值。
参数 i 对应 AUX 的通道参量，设置范围是 1～4。
参数 x 用于设置输出放大倍数，范围是 0.001 ≤ x ≤ 10000 的实数，最小分辨率是 0.001。</td></tr>
</table>

AXOS (?) i {, j}

AXOS 指令用于设置或查询 OE2011 后面板的 AUXOUT 输出通道的信号源。

参数 i 对应 AUX 的通道参量，设置范围是 1～4。

参数 j 用于选择输出值的类型，具体如下：

j	AUX 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

6.2.6. 自动设置指令

ARNG	ARNG 指令用于打开输入通道的自动量程的功能。该指令作用与在菜单按下 <Auto Range> 作用相同。
APHS i	APHS 指令用于打开解调器的自动相位补偿功能。该指令作用和在菜单按下 <Auto Phase> 作用相同。 参数 i 对应解调器通道，参数 i=0 时选择配置全部 8 个解调器，i=1 时选择解调器 Demod1，i=2 时选择解调器 Demod2……i=8 时选择解调器 8。 例如，发送 APHS 2; 指令会自动把解调器 2 的当前相位值调整为 0，其相位值会设置到解调器 2 的 Ref.Phase 中。 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。
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 对应解调器通道，参数 i=0 时选择全部 8 个解调器，i=1 时选择解调器 Demod1，i=2 时选择解调器 Demod2……i=8 时选择解调器 8。
AOFP i	AOFP 指令用于打开自动设置 CHOUT 通道的输出偏置值的功能。该指令作用和在菜单按下 <Auto CH Offset> 作用相同。 参数 i 对应 CHOUT 通道，i=0 时选择全部 2 个 CHOUT 通道；i=1 时选择 CH1；i=2 时选择 CH2。

6.2.7. 保存读取设置指令

SSET i	SSET i 指令用于把 OE2011 当前的设置保存到配置存储区中，即 Setting buffer i(1≤i≤4)。 Setting buffer 里面的配置信息在 OE2011 断电后依然保留。
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 内部参数将会被设置成与 Setting buffer i 里相同的参数。

6.2.8. 复位与 IDN 指令

*RST	*RST 指令用于软复位 OE2011。仪器内部的所有状态与参数保持不变，但数据缓存区内的数据会丢失。 号是为了补齐 4 位命令字符。
*IDN?	*IDN? 指令用于查询 OE2011 的 ID，格式为 “Sine Scientific Instruments, OE2011, SN:XXXXXX, Ver:XXXXX”。其中第一个为公司名称，第二个为型号，如 OE2011；第三个为序列号，如 SN:00001；第四个为版本号，如 Ver:1.00-1.10。 * 号是为了补齐 4 位命令字符。

6.2.9. 数据和状态读取指令

<table>
<tr>
<td>OUTP? i</td>
<td>
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：
<table>
<tr><th>i</th><th>Parameter</th><th>i</th><th>Parameter</th></tr>
<tr><td>0</td><td>X-Demod1</td><td>22</td><td>R-Demod6</td></tr>
<tr><td>1</td><td>Y-Demod1</td><td>23</td><td>θ-Demod6</td></tr>
<tr><td>2</td><td>R-Demod1</td><td>24</td><td>X-Demod7</td></tr>
<tr><td>3</td><td>θ-Demod1</td><td>25</td><td>Y-Demod7</td></tr>
<tr><td>4</td><td>X-Demod2</td><td>26</td><td>R-Demod7</td></tr>
<tr><td>5</td><td>Y-Demod2</td><td>27</td><td>θ-Demod7</td></tr>
<tr><td>6</td><td>R-Demod2</td><td>28</td><td>X-Demod8</td></tr>
<tr><td>7</td><td>θ-Demod2</td><td>29</td><td>Y-Demod8</td></tr>
<tr><td>8</td><td>X-Demod3</td><td>30</td><td>R-Demod8</td></tr>
<tr><td>9</td><td>Y-Demod3</td><td>31</td><td>θ-Demod8</td></tr>
<tr><td>10</td><td>R-Demod3</td><td>32</td><td>Xnoise-Demod1</td></tr>
<tr><td>11</td><td>θ-Demod3</td><td>33</td><td>Ynoise-Demod1</td></tr>
<tr><td>12</td><td>X-Demod4</td><td>34</td><td>Xnoise-Demod5</td></tr>
<tr><td>13</td><td>Y-Demod4</td><td>35</td><td>Ynoise-Demod5</td></tr>
<tr><td>14</td><td>R-Demod4</td><td>36</td><td>Frequency-OSC1</td></tr>
<tr><td>15</td><td>θ-Demod4</td><td>37</td><td>Frequency-OSC2</td></tr>
<tr><td>16</td><td>X-Demod5</td><td>38</td><td>AUXIN1</td></tr>
<tr><td>17</td><td>Y-Demod5</td><td>39</td><td>AUXIN2</td></tr>
<tr><td>18</td><td>R-Demod5</td><td>40</td><td>AUXIN3</td></tr>
<tr><td>19</td><td>θ-Demod5</td><td>41</td><td>AUXIN4</td></tr>
<tr><td>20</td><td>X-Demod6</td><td>42</td><td>时间戳</td></tr>
<tr><td>21</td><td>Y-Demod6</td><td></td><td></td></tr>
</table>
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 在同一个时刻最多 20 个不同的测量值。
指令 SNAP? 用于在同一时刻查询 <X>、<Y>、<R>、<θ> 或 <F> 等瞬时值，该功能在时间常数较短或信号变化较快的场景中尤为重要。使用 OUTP? 指令依次查询多个参数，各个参数返回值之间会有一定延时，导致所获数据并非严格同步。在动态信号测量中，此类时序偏差可能引入显著误差。而 SNAP? 指令确保所有指定参数基于同一内部采样点计算并输出，从而保证数据的时间一致性。
SNAP?i 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：
</td>
</tr>
</table>

SNAP? i {,j,k,l,m,n,o,p……}

i,j,k,l,m,n,o,p……	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
42	时间戳

	返回的值是一个字符串，该字符串内不同值之间用逗号 (,) 分隔，并且参数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。
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=1 时读取 AUX-IN1；i=2 时读取 AUX-IN2；i=3 时读取 AUX-IN3；i=4 时读取 AUX-IN4。 查询返回结果是实数，以伏特 (V) 为单位，但单位不会输出。
INOV?	INOV? 指令用于查询输入通道的 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发生溢出；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? 指令用于查询输入通道的 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=1 时读取 OSC1 的锁相环的状态，i=2 时读取 OSC2 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。

6.2.10. 时钟与触发信号配置指令

<table>
<tr><td>TMOD (?) {i}</td><td>TMOD 指令用于设置或查询仪器的时钟源。
发送指令时参数 i 表示选择时钟模式：
i=0 表示使用内部时钟；
i=1 表示使用外部 10 MHz 时钟。</td></tr>
<tr><td>TSTA?</td><td>TSTA? 指令用于查询仪器的时钟 PLL 状态。
返回参数类型为整型：
0 表示所有时钟 PLL 均不正常；
2 表示内部时钟 PLL 正常；
7 表示外部时钟 PLL 正常。</td></tr>
<tr><td>OCLK (?) {i}</td><td>OCLK 指令用于设置或查询仪器的 10 MHz 时钟输出接口启用状态。
参数 i=0 表示关闭 Clock out 接口，接口输出保持低电平；
参数 i=1 表示打开 Clock out 接口，此时接口输出 10 MHz/3.3 V 的方波时钟。</td></tr>
<tr><td>TRIG (?) {i}</td><td>TRIG 指令用于设置或查询仪器的触发源类型。
参数 i=0 表示使用仪器内部触发源，所有数据采样取决于仪器内部时钟；
参数 i=1 表示使用外部触发源 Trigger in。</td></tr>
<tr><td>TRIM (?) {i}</td><td>TRIM 指令用于设置或查询仪器的外部触发模式。
参数 i 对应的外部触发模式如下：
<table>
<tr><th>i</th><th>外部触发模式</th></tr>
<tr><td>0</td><td>上升沿</td></tr>
<tr><td>1</td><td>下降沿</td></tr>
<tr><td>2</td><td>边沿触发</td></tr>
<tr><td>3</td><td>高电平触发</td></tr>
<tr><td>4</td><td>低电平触发</td></tr>
</table>
在选择上升沿、下降沿或边沿触发模式时，仪器将在检测到触发信号边沿的瞬时输出数据。
在选择高/低电平触发模式时，仪器将在触发信号处于相应电平状态期间，按照用户设定的采样率连续输出数据，相当于施加了窗口函数以限定数据输出范围。</td></tr>
<tr><td>TRIO (?) {i}</td><td>TRIO 指令用于设置或查询仪器的 Trigger out 接口的启用状态。
参数 i=0 表示 Trigger out 接口处于关闭状态，接口输出保持低电平；
参数 i=1 表示启用 Trigger out 接口，接口将根据仪器当前的触发模式输出触发信号。</td></tr>
<tr><td>TRIF (?) {f}</td><td>TRIF 指令用于设置或查询仪器内部触发模式时的采样率。
参数 f 表示数据采样速率，可设置范围为：0.01~100 000 Hz。</td></tr>
</table>

第 7 章 性能测试

简介

本章通过一系列性能测试，帮助用户验证设备的测量准确性，从而增强对设备可靠性的信心。所有测试结果均可记录在本章末尾所附的性能测试记录表中，便于后续评估性能。

序列号

如需联系本公司技术支持，请务必提供设备的序列号，以便我们快速处理问题。

序列号清晰标注于设备背面及外包装箱上。此外，设备开机后，也可通过进入 <INFO> 界面查看该信息。

固件版本

设备开启后，可通过访问 <INFO> 界面可以查看设备的固件版本号。

预热

由于设备内部元器件存在温漂特性，为确保测试结果的准确性，建议在正式测试前对设备进行充分预热。推荐预热时间为 30 至 60 分钟，以使系统达到热稳定状态，有效降低测量误差。

测试记录

本章末尾附有性能测试记录表，用于记录系统各项测试数据。建议在正式填写前先对记录表进行备份。

完成全部测试后，请根据记录表中的实测数据，全面评估设备性能是否符合预期指标。请妥善保存该记录表，未来与我司工程师沟通时可作为重要参考依据。

测试失败

若某项测试未通过，请按以下步骤排查：

1、复核设置：仔细检查本设备及所有外部连接设备的配置是否正确；

2、重新预热：确认设置无误后，对设备进行充分预热，并重复执行测试；

3、更换外设：如条件允许，尝试使用其他已知良好的外部设备，排除外围干扰因素。

若上述措施后测试仍失败，请：

1、记录设备的序列号与固件版本号；

2、整理完整的性能测试记录表；

3、及时联系本公司技术支持团队，以便进一步协助诊断与处理。

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 100 MHz
Spurious	≤−55 dBc
TTL SYNC	Available
Output Setup	50 Ω or High Z
推荐	AGILENT 33600B 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 mV_{pp}
推荐	RIGOL DP831A

4. 连接器

BNC 电阻	50 Ω
BNC-T 型连接器	

5. 连接线

BNC-BNC 连接线	0.5 米线长若干条
BNC-BNC 连接线	1 米线长若干条

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 Ω BNC 电阻负载将 IN+ 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：

<OSC1> 的 <Osc.Mode>：	修改为 <Internal>
<OSC1> 的 <Osc.Frequency>：	修改为 1Hz
<Signal In> 的 <Input Range>：	使用旋钮修改为 <1mV>
<Demod1> 的 <Time Constant>：	修改为 1s
<Demod1> 的 <Filter dB/oct>：	修改为 <24 dB/oct>

3) 等待 10 秒后，记录 <R-Demod1> 值；
4) 修改设置：

<Coupling>：	修改为 <DC>

5) 等待 10 秒后，记录 <R-Demod1> 的值；
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

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 IN+、IN-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 IN+、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) 按以下顺序修改设置：

<Signal In> 的 <Input Range>：	使用旋钮修改为 <5 V>
<Signal In> 的 <Coupling>：	修改为 <DC>
<Osc1> 的 <Osc.Mode>：	修改为 <Internal>
<Osc1> 的 <Osc.Frequency>：	修改为 100 Hz
<Output Source>：	修改为 <OSC1>
<Signal Out> 的 <Amplitude>：	修改为 1 V_{rms}

3) 等待 <R> 值稳定，<R> 值应该为 1.000 V_{rms}（1% 误差内）；
4) 按以下顺序修改设置：

<Input Port>：	修改为 <DIFF>
<Input Range>：	使用旋钮修改为 <1 mV>

5) 等待 10 秒后，记录 <R-Demod1> 和 <R-Demod5> 的值；
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

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 IN+ 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 V_{rms}
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) 按以下顺序修改设置：

<Demod1> 的 <Filter dB/oct>：	修改为 <24 dB/oct>
<Demod1> 的 <Time Constant>：	修改为 300 ms
<Signal In> 的 <Coupling>：	修改为 <DC>
<Osc1> 的 <Osc.Mode>：	修改为 <External>

3) 幅值精度的测试需要保持函数信号发生器的频率为 10 kHz，按以下顺序修改锁相放大器的 <Input Range> 和函数发生器的 <Amplitude>：

Input Range	Amplitude
5 V	2.000 V_{rms}
1 V	0.500 V_{rms}
200 mV	100.00 mV_{rms}
50 mV	25.000 mV_{rms}
10 mV	5.000 mV_{rms}
2 mV	1.000 mV_{rms}
1 mV	1.000 mV_{rms}

a) 设置函数信号发生器的幅值；
b) 等待 10 秒后，记录 <R-Demod1> 的值，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) 频率响应的测试在不小于 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 kHz
10 kHz
100 kHz
1 MHz

a) 设置函数信号发生器幅值为 100.00 mV_{rms}；
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

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 IN+ 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 接口。

设置函数信号发生器：

函数：	正弦波
频率：	1 kHz
幅值：	1 V_{rms}
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) 按以下顺序修改设置：

<Demod1> 的 <Filter dB/oct>：	修改为 <24 dB/oct>
<Demod1> 的 <Time Constant>：	修改为 300 ms
<Signal In> 的 <Input Range>：	使用旋钮修改为 <1 V>
<Osc1> 的 <Osc.Mode>：	修改为 <External>

3) 保持函数信号发生器的频率为 10 kHz，按以下顺序修改其幅值：

Amplitude
1.0000 V_{rms}
100.00 mV_{rms}
10.000 mV_{rms}
1.0000 mV_{rms}

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

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 1 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 100 kHz；
3) 设置锁相放大器 <Osc1> 的 <Osc.Mode> 为 <External>。
4) 等待锁相放大器屏幕右下方的 <PLL> 由 <UNLOCK> 变为 <LOCKED> 后，连接上位机程序，记录 Osc1 的 <Freq> 值；
5) 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锁相放大器产生的正弦波（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 Signal In 的 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) 修改以下设置：

<Signal In> 的 <Input Range>：	使用旋钮修改为 <5 V>
<Demod1> 的 <Filter dB/oct>：	修改为 <24 dB/oct>
<Demod1> 的 <Time Constant>：	修改为 <300 ms>
<OSC1> 的 <Osc.Mode>：	修改为 <Internal>
<OSC1> 的 <Osc.Frequency>：	修改为 10 kHz
<Signal Out> 的 <Output Source>：	修改为 <OSC1>
<Signal Out> 的 <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 10 kHz，按以下顺序修改 <Input Range> 和 Sine 幅值 <Amplitude>：

Input Range	Sineout Amplitude
5 V	1.6 V_{rms}
200 mV	0.160 V_{rms}
50 mV	0.016 V_{rms}
2 mV	0.0016 V_{rms}

a) 设置 <Sineout> 的幅值 <Amplitude>；
b) 设置 <Signal Input> 的 <Input Range>；
c) 等待 10 秒后，记录 <R-Demod1> 值和 <θ-Demod1> 的值，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) 频率响应的测试在不小于 1 kHz 的频率下进行，按以下顺序修改 <Osc.Frequency> 的值：

Test Frequency
1 kHz
10 kHz
100 kHz
1 MHz

a) 设置 <Signal Input> 的 <Input Range> 为 200 mV；
b) 设置 <Sineout> 的幅值 <Amplitude> 为 0.160 V_{rms}；
c) 按顺序设置 <OSC1> 的 <Osc.Frequency> 的值；
d) 等待 10 秒后，记录 <R-Demod1> 值和 <θ-Demod1> 的值，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

使用线性直流稳压源作为直流输入。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 CHOUT 1 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 3b 到 3c，直到完成 CHOUT 1 的测试，然后依次更换 CHOUT 2 接口连接到数字万用表，继续完成测试。

4) 按以下步骤：

a) 使用信号线连接后面板的 AUXOUT 1 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 4b 到 4c，直到完成 AUXOUT 1 的测试，然后依次更换 AUXOUT 的 2–4 接口连接到数字万用表，继续完成测试。

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后面板的 AUX-IN 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 5c 到 5d，直到完成 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。使用 50 Ω 的 BNC 电阻短接到 Signal In 的 IN+ 接口，模拟实际使用中输入端接有信号源的 50 Ω 源阻抗的情况。

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：

<Osc1> 的 <Osc.Mode>：	修改为 <Internal>
<Osc1> 的 <Osc.Frequency>：	修改为 1 kHz
<Signal In> 的 <Input Range>：	使用旋钮修改为 <1 mV>
<Demod1> 的 <Time Constant>：	修改为 10 ms
<Demod1> 的 <Filter dB/oct>：	修改为 <24 dB/oct>
<Window Display>：	修改 Window <2> 为 <X-Noise-Demod1>

3) 等待读数较为稳定后（约 2 min），记录 X-Noise 值（取平均值）；

4) 依次修改以下参数：

<Osc.Frequency>
1 kHz
10 kHz
100 kHz
1 MHz

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 性能测试记录表 (1/4)

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	Reading	Upper
5 V	2.000 V_{rms}	1.980 V	_____	2.020 V
1 V	500.0 mV_{rms}	495.00 mV	_____	505.00 mV
200 mV	100.00 mV_{rms}	99.00 mV	_____	101.00 mV
50 mV	25.000 mV_{rms}	24.75 mV	_____	25.25 mV
10 mV	5.000 mV_{rms}	4.950 mV	_____	5.050 mV
2 mV	1.0000 mV_{rms}	0.990 mV	_____	1.010 mV
1 mV	1.0000 mV_{rms}	0.990 mV	_____	1.010 mV

Input Range	Frequency	Lower	Reading	Upper
200 mV	1 kHz	99 mV	_____	101 mV
Amplitude	10 kHz	99 mV	_____	101 mV
100.00 mV_{rms}	100 kHz	99 mV	_____	101 mV
	1 MHz	99 mV	_____	101 mV

5. 幅值线性度

Input Range	Amplitude	Lower	Reading	Upper
1 V	1.000 V_{rms}	0.990 V	_____	1.010 V
	100.0 mV_{rms}	99.00 mV	_____	101.0 mV
	10.00 mV_{rms}	9.900 mV	_____	10.10 mV
	1.000 mV_{rms}	0.990 mV	_____	1.010 mV

OE2011 性能测试记录表 (2/4)

6. 频率精度

	Frequency	Lower	Reading	Upper
REF IN	100 kHz	99.999 kHz	_____	100.001 kHz

7.Sine Out 幅值相位的精度与平坦度

Range	SineOut Ampl.	Lower	Reading	Upper
5 V	1.600 V_{rms}	1.568 V	R: _____	1.632 V
		−2.000°	θ: _____	2.000°
200 mV	160 mV_{rms}	156.8 mV	R: _____	163.2 mV
		−2.000°	θ: _____	2.000°
50 mV	16 mV_{rms}	15.68 mV	R: _____	16.32 mV
		−2.000°	θ: _____	2.000°
2 mV	1.6 mV_{rms}	1.568 mV	R: _____	1.632 mV
		−2.000°	θ: _____	2.000°

SineOut Ampl.	Frequency	Lower	Reading	Upper
160.0 mV_{rms}	1 kHz	1.568 V	R: _____	1.632 V
		−2.000°	θ: _____	2.000°
	10 kHz	1.568 V	R: _____	1.632 V
		−2.000°	θ: _____	2.000°
	100 kHz	1.568 V	R: _____	1.632 V
		−2.000°	θ: _____	2.000°
	1 MHz	1.568 V	R: _____	1.632 V
		−2.000°	θ: _____	2.000°

8. 直流输出与输入

Output	Voltage	Lower	Reading	Upper
CH OUT 1	10.000 V	9.940 V	_____	10.060 V
	5.000 V	4.965 V	_____	5.035 V
	0.000 V	−0.010 V	_____	0.010 V
	−5.000 V	−5.035 V	_____	−4.965 V
	−10.000 V	−10.060 V	_____	−9.940 V

OE2011 性能测试记录表 (3/4)

8. 直流输出与输入（续前表）

Output	Voltage	Lower	Reading	Upper
CH OUT 2	10.000 V	9.940 V	_____	10.060 V
	5.000 V	4.965 V	_____	5.035 V
	0.000 V	−0.010 V	_____	0.010 V
	−5.000 V	−5.035 V	_____	−4.965 V
	−10.000 V	−10.060 V	_____	−9.940 V

Output	Voltage	Lower	Reading	Upper
AUX OUT 1	10.000 V	9.940 V	_____	10.060 V
	5.000 V	4.965 V	_____	5.035 V
	0.000 V	−0.010 V	_____	0.010 V
	−5.000 V	−5.035 V	_____	−4.965 V
	−10.000 V	−10.060 V	_____	−9.940 V

Output	Voltage	Lower	Reading	Upper
AUX OUT 2	10.000 V	9.940 V	_____	10.060 V
	5.000 V	4.965 V	_____	5.035 V
	0.000 V	−0.010 V	_____	0.010 V
	−5.000 V	−5.035 V	_____	−4.965 V
	−10.000 V	−10.060 V	_____	−9.940 V

Output	Voltage	Lower	Reading	Upper
AUX OUT 3	10.000 V	9.940 V	_____	10.060 V
	5.000 V	4.965 V	_____	5.035 V
	0.000 V	−0.010 V	_____	0.010 V
	−5.000 V	−5.035 V	_____	−4.965 V
	−10.000 V	−10.060 V	_____	−9.940 V

Output	Voltage	Lower	Reading	Upper
AUX OUT 4	10.000 V	9.940 V	_____	10.060 V
	5.000 V	4.965 V	_____	5.035 V
	0.000 V	−0.010 V	_____	0.010 V
	−5.000 V	−5.035 V	_____	−4.965 V
	−10.000 V	−10.060 V	_____	−9.940 V

OE2011 性能测试记录表 (4/4)

8. 直流输出与输入（续前表）

Input	Voltage	Lower	Reading	Upper
AUX IN 1	10.000 V	9.940 V	_____	10.060 V
	5.000 V	4.965 V	_____	5.035 V
	0.000 V	−0.010 V	_____	0.010 V
	−5.000 V	−5.035 V	_____	−4.965 V
	−10.000 V	−10.060 V	_____	−9.940 V
Input	Voltage	Lower	Reading	Upper
AUX IN 2	10.000 V	9.940 V	_____	10.060 V
	5.000 V	4.965 V	_____	5.035 V
	0.000 V	−0.010 V	_____	0.010 V
	−5.000 V	−5.035 V	_____	−4.965 V
	−10.000 V	−10.060 V	_____	−9.940 V
Input	Voltage	Lower	Reading	Upper
AUX IN 3	10.000 V	9.940 V	_____	10.060 V
	5.000 V	4.965 V	_____	5.035 V
	0.000 V	−0.010 V	_____	0.010 V
	−5.000 V	−5.035 V	_____	−4.965 V
	−10.000 V	−10.060 V	_____	−9.940 V
Input	Voltage	Lower	Reading	Upper
AUX IN 4	10.000 V	9.940 V	_____	10.060 V
	5.000 V	4.965 V	_____	5.035 V
	0.000 V	−0.010 V	_____	0.010 V
	−5.000 V	−5.035 V	_____	−4.965 V
	−10.000 V	−10.060 V	_____	−9.940 V

9. 输入噪声

Osc.Frequency	Input Range	Reading	Upper Limit
1 kHz	1 mV	_____	6 nV/$\sqrt{\text{Hz}}$
10 kHz		_____	4 nV/$\sqrt{\text{Hz}}$
100 kHz		_____	4 nV/$\sqrt{\text{Hz}}$
1 MHz		_____	4 nV/$\sqrt{\text{Hz}}$

第 8 章 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 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 mV_{rms}、频率为 100 kHz 的正弦波，并用 OE2011 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 前面板 SIGNAL IN 的 IN+ 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 前面板的 REF IN 1 接口，如图 98 所示：

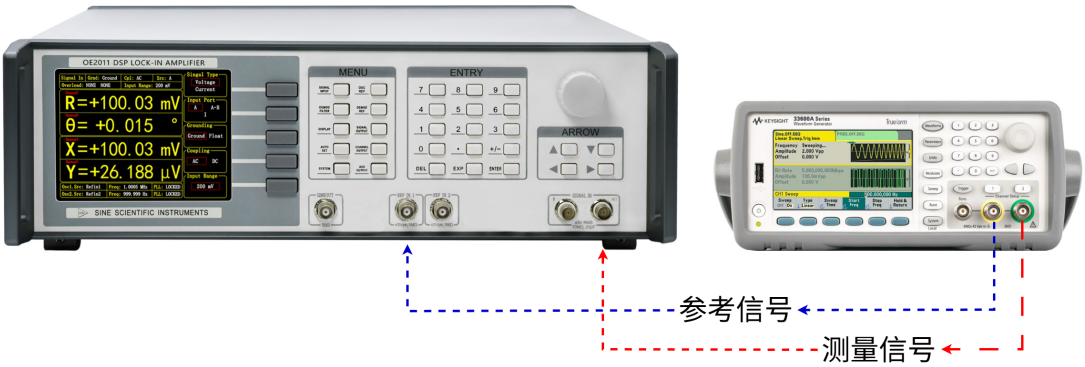


图 98. 信号线连接图

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 mV_{rms}”、“频率：100 kHz”、“输出阻抗：高阻”、“同步接口：打开”，待测信号和同步信号的波形图如图 99 所示：

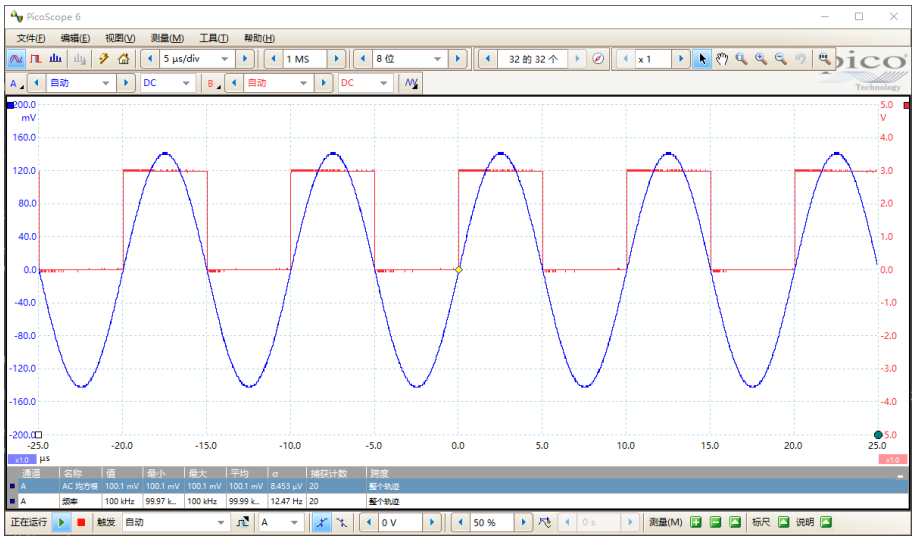


图 99. 待测信号波形图

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：

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 输入端

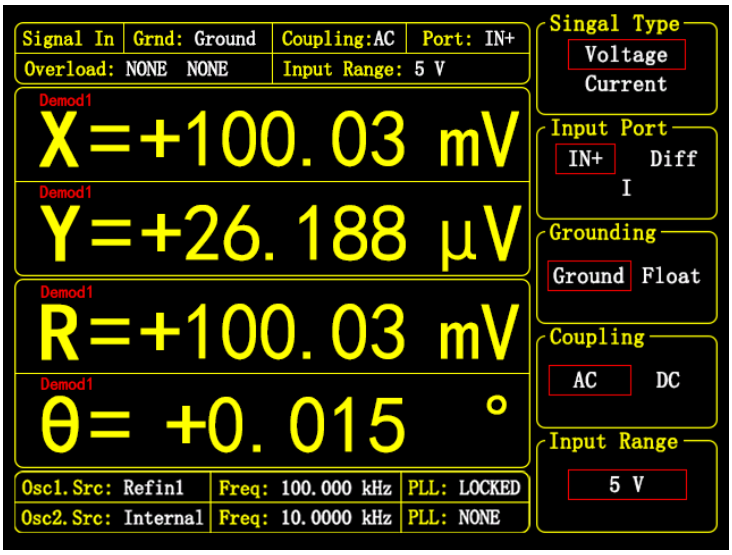


图 100. 主界面状态栏

峰值高于 7 V 或谷值低于 −7 V（最大量程 5 V_{rms} 对应的峰谷值电平）时发生前级溢出，因此本例中数字信号发生器输出幅值为 100 mV_{rms} 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 101. [SIGNAL INPUT] 菜单位置

[SIGNAL INPUT] 子菜单界面如下：

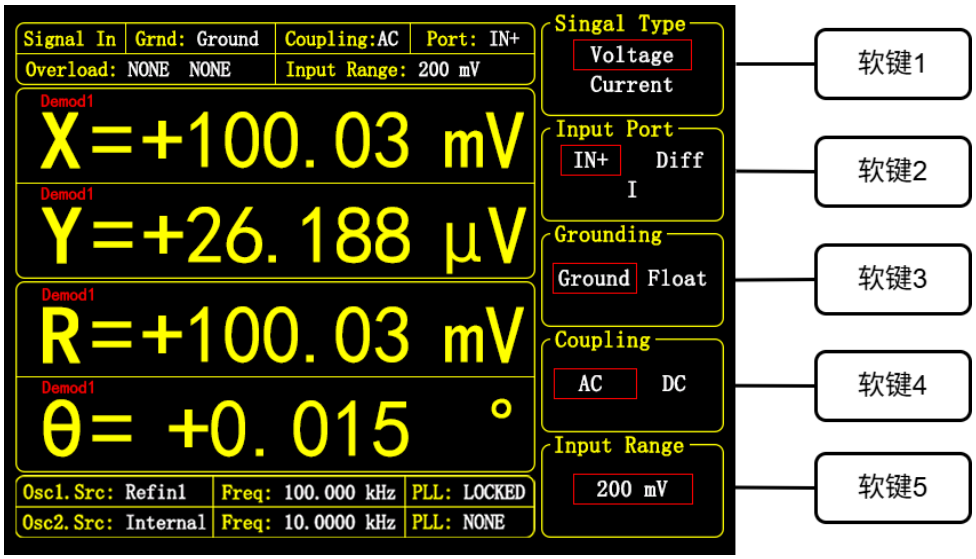


图 102. [SIGNAL INPUT] 菜单界面

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，使测量信号值尽量接近输入量程而不发生溢出。此处我们调节为 <200 mV> 即可。至此，我们测出了从函数信号发生器输送过来的正弦波信号，如图 102 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 103. [DISPLAY] 菜单位置

[DISPLAY] 子菜单界面如下：

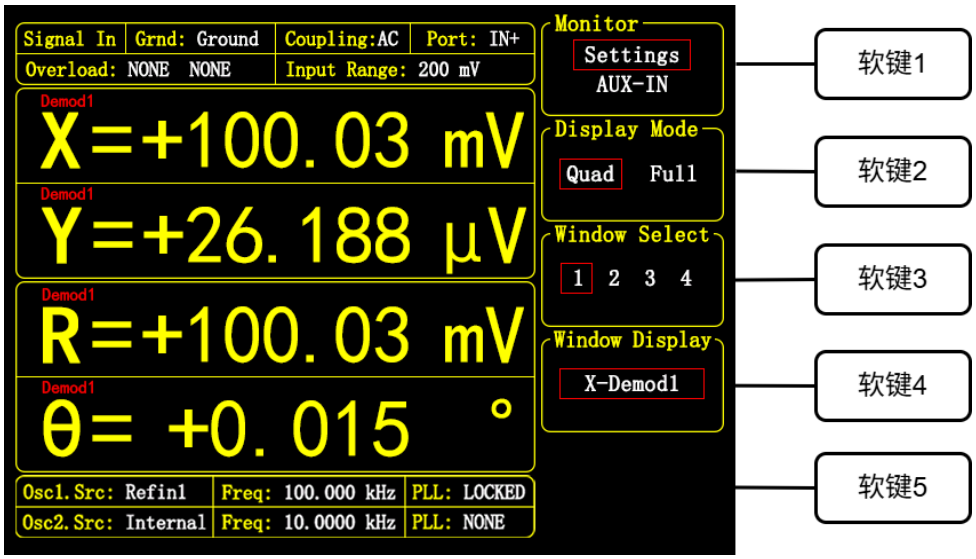


图 104. [DISPLAY] 菜单界面

系统默认设置中，数据栏四分栏分别显示 Demod1 的 <X>、<Y>、<R>、<θ> 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”，切换选择 <Window Select> 菜单中的 <1>、<2>、<3>、<4>，例如选中 <2> 则表示第 2 个分栏被选中；然后按下 “软键 4”，选中 <Window Display> 菜单，通过旋钮选择改成 “R-Demod2” 值。修改完成后如图 105 所示，通过此方法可以查看想要的测量结果。

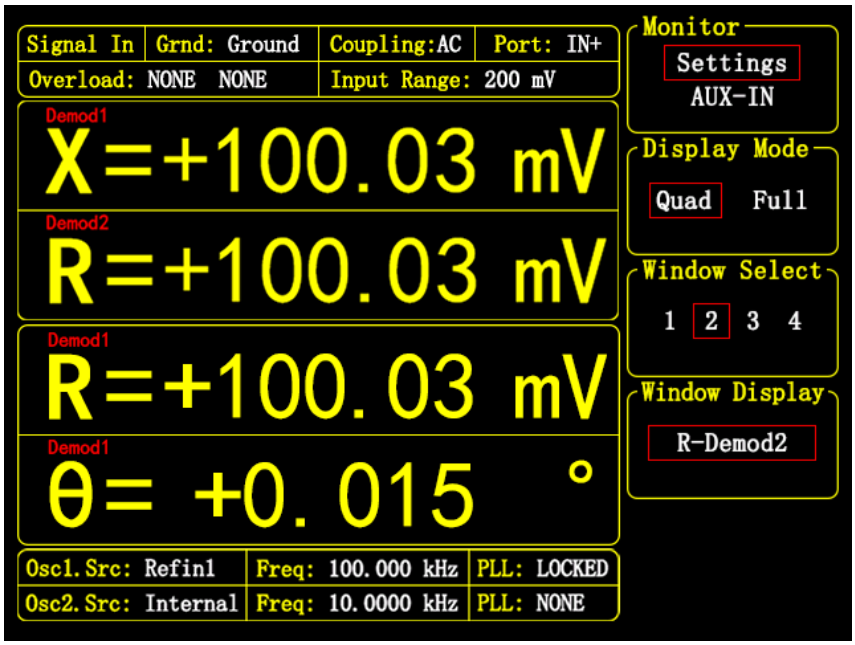


图 105. 修改分栏显示结果

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 160 mV_{pp}、频率为 1kHz 的方波，并用 OE2011 进行测量其 1 – 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 前面板 SIGNAL IN 的 IN+ 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 1 接口，如图 106 所示：

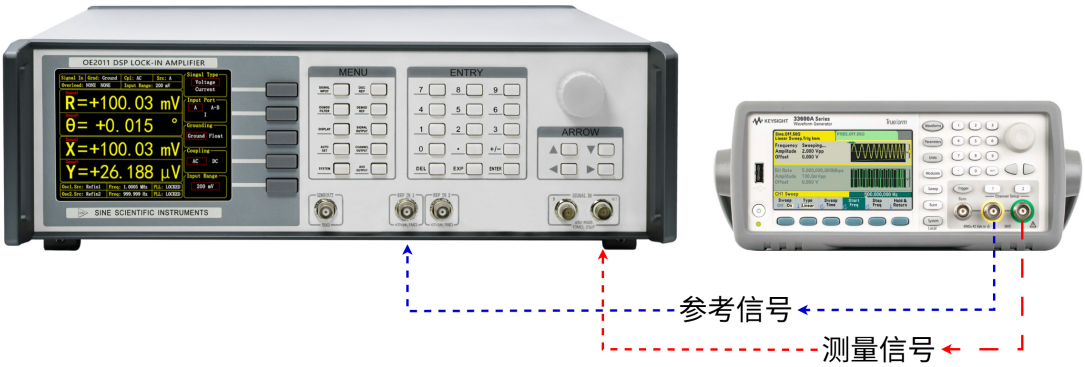


图 106. 信号线连接图

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 mV_{pp}”、“频率：1kHz”，待测信号的波形图如图 107 所示：

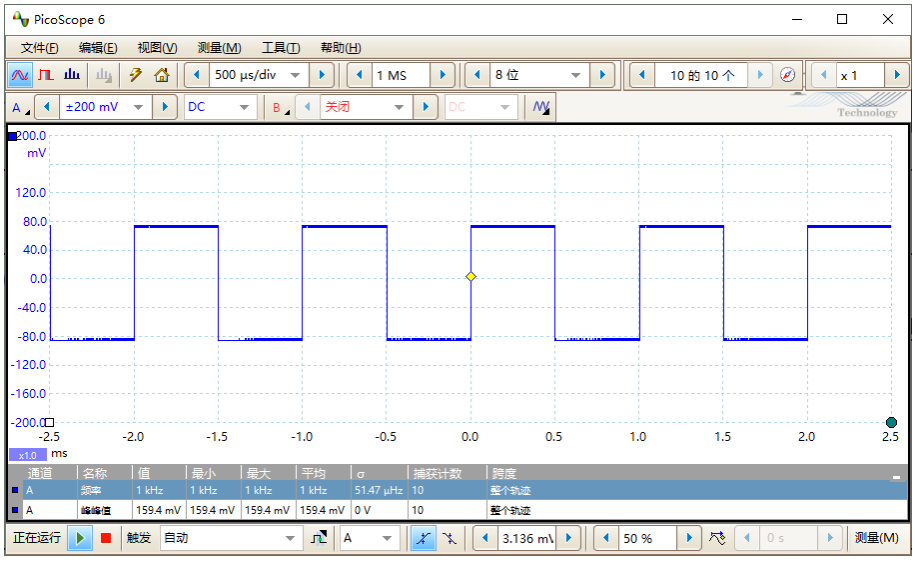


图 107. 待测信号参数图

4. 按下前面板 [DEMOD REF] 按键（图 108 所示）进入子菜单。



图 108. [DEMOD] 子菜单位置

[DEMOD REF] 子菜单界面如图 109 所示：

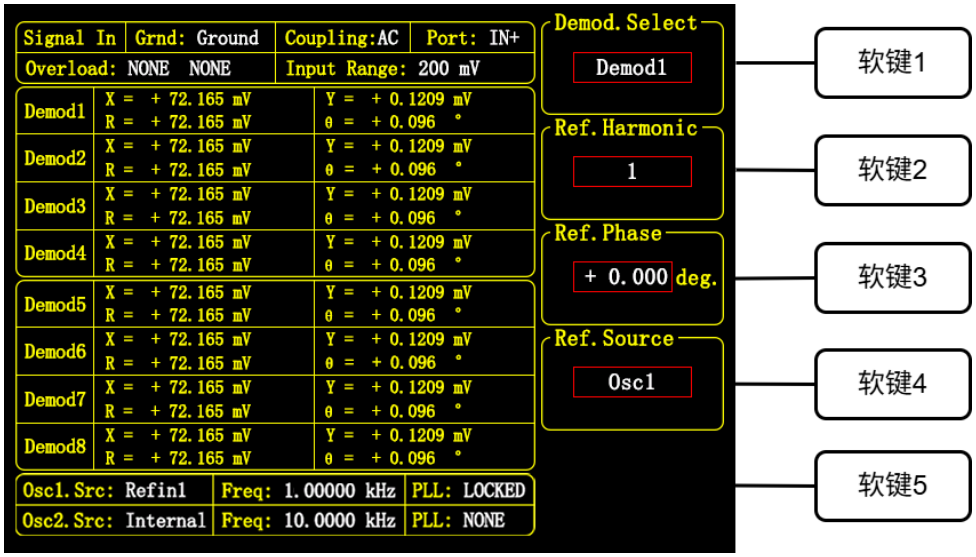


图 109. DEMOD REF 子菜单

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谐波阶次。

5. 同时测量输入方波的 1－8 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 1－8 的谐波阶数为 1－8。
6. 然后在 [DISPLAY] 子菜单中，按下 “软键 2”，把 <Display Mode> 设置为 <Full> 模式，如图 110 所示，显示所有基波和谐波的测量结果。

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：

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

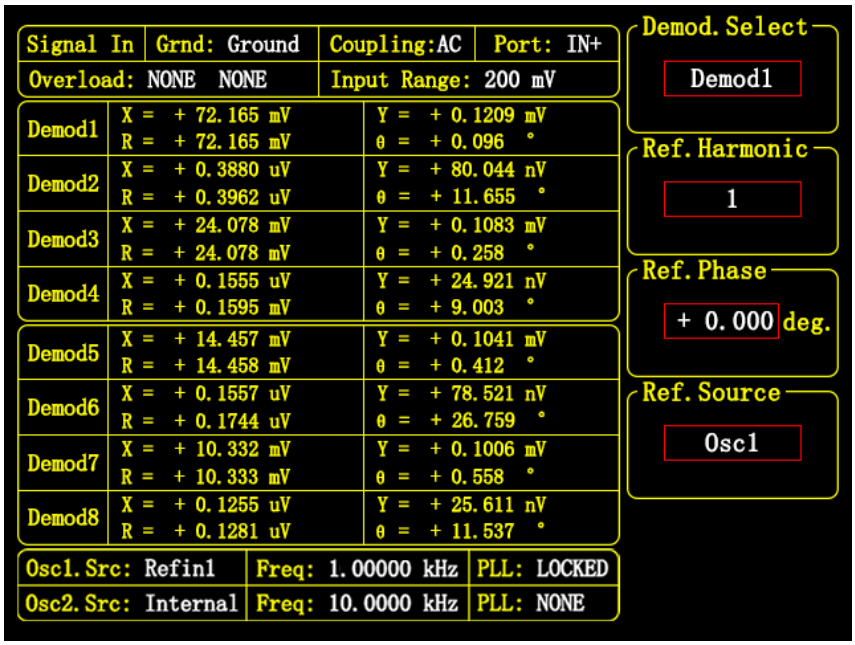


图 110. 方波的谐波测量结果

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 160 mV，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：$R = \frac{\sqrt{2}\times 160}{7\times\pi}\text{mV} \approx 10.203\,\text{mV}$

而 2、4、6、8 次谐波理论值则为 0 V。

根据以上算法，即可将测量值与理论计算值进行对比。如图 110 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：

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

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：

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

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 100 kHz、200 mV_{rms} 的正弦波作为载波，设置 10 kHz、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 200 mV_{rms}，实际只有 100 mV_{rms} 的幅度。函数发生器输出的波形图如图 111 所示：

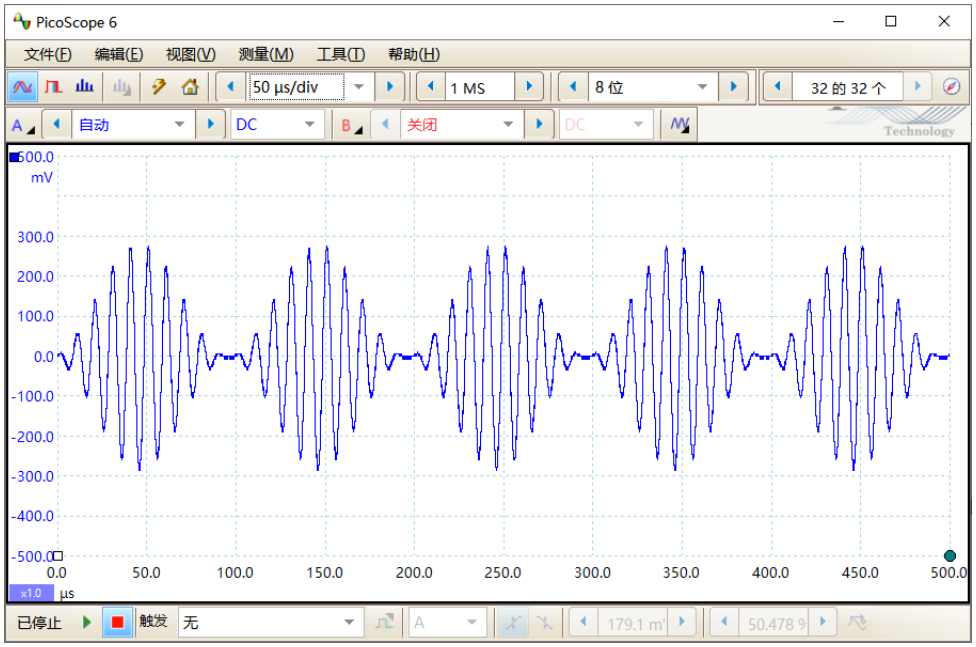


图 111. AM 调制信号的波形

2. OE2011 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 90.0000 kHz；

   解调器 Demod3 的 <Ref.Source> 为 <Frequency>，<Frequency Set> 为 110.000 kHz；

   此时 OE2011 的 3 个解调器将分别解调 100 kHz、90 kHz 和 110 kHz 的频率分量，测量结果如图 112 所示：

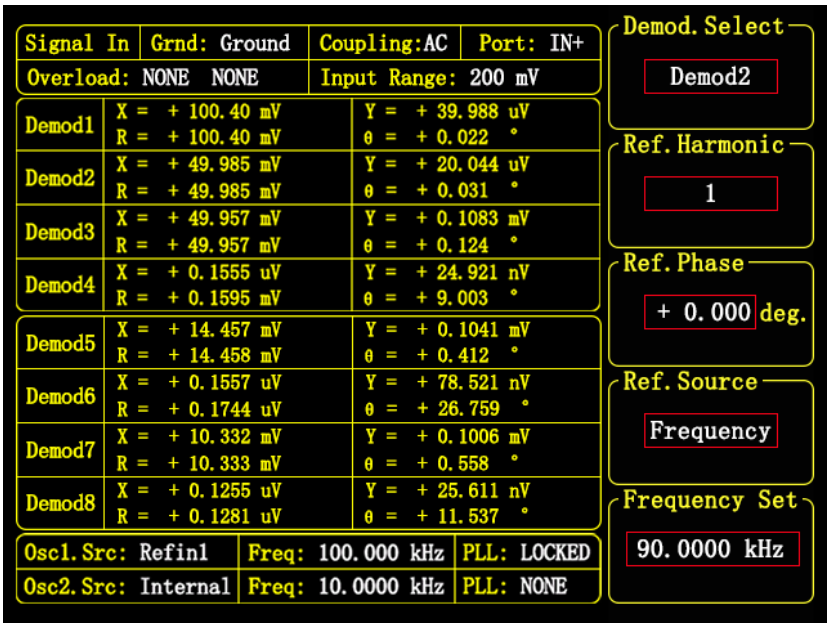


图 112. AM 解调器测量结果

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

8.4 串口通讯

本实例将演示 OE2011 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 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 113：

   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 串口默认波特率为 921600，校验位无，数据位 8 位，停止位 1 位（OE2011 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 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 114 所示：

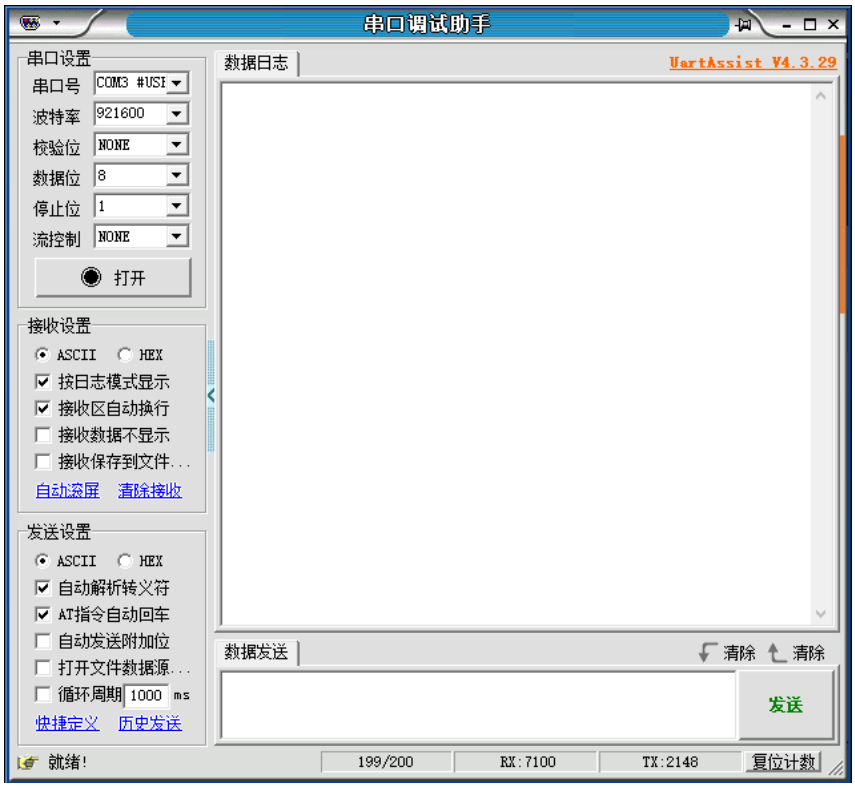


图 113. UartAssist 的软件界面

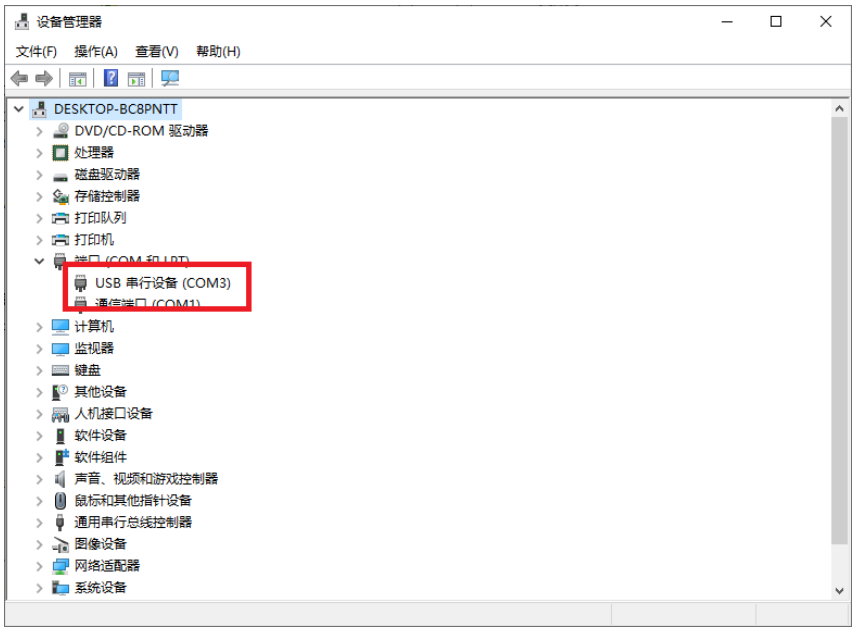


图 114. 端口号的查看

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（连接），需要点击一次改变按钮状态显示为红色点亮状态（断开），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 115 所示：

4. 完成以上操作之后，即可通过发送指令与 OE2011 进行通讯：

OE2011 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“ISRC0;”或“*IDN?;+



图 115. 连接成功的状态

回车符（0D)”，连续多条的指令可以用分号“;”分隔开，指令结尾一定要附加上分号“;”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，然后输入分号“;”，最后点击发送按钮，指令就会发送出去。如图 116 所示：



图 116. 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 117 所示：



图 117. 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?1;”效果如图 118 所示：



图 118. 多重指令的执行

连续读取 OE2011 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 119、图 120 所示：

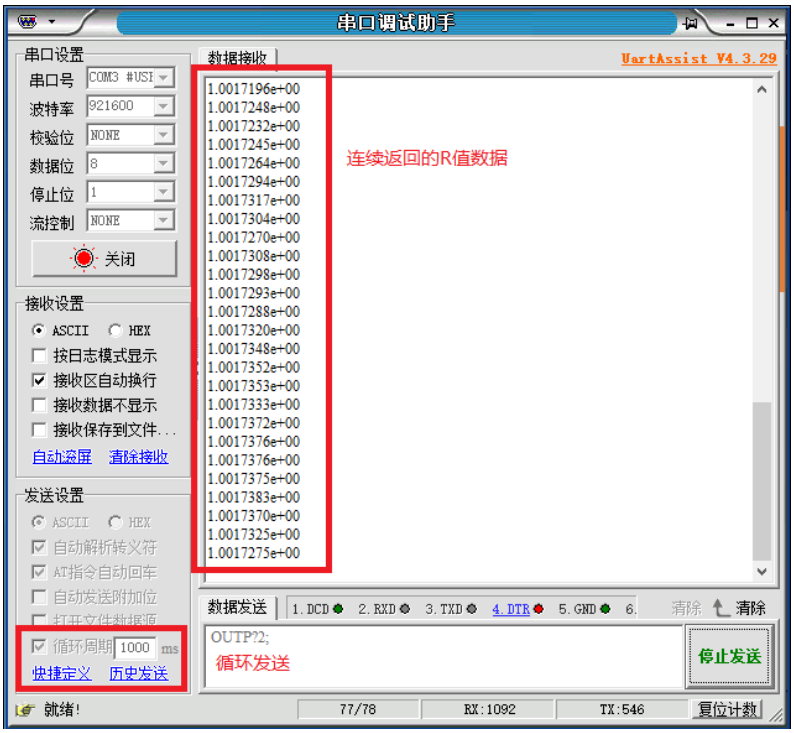


图 119. 连续读取单个 R 值

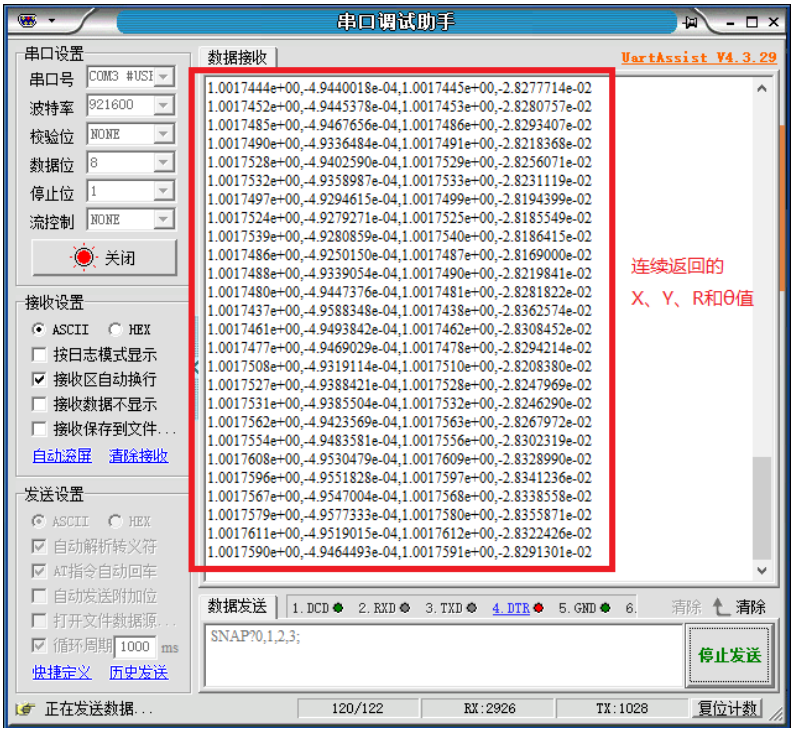


图 120. 连续读取 X、Y、R、θ 值

通过串口调试助手远程控制发送指令设置 OE2011 内部参数时，会同时更新 LCD 显示屏上对应参数的状态。例如 OE2011 当前状态栏的 <Input Range> 值为 <5 V>，对应指令为 IRNG，参数为 0。当发送了指令“IRNG2;”之后，OE2011 状态栏 <Input Range> 值会改变为指令参数所对应的值 <200 mV>。屏幕界面如图 121 所示：

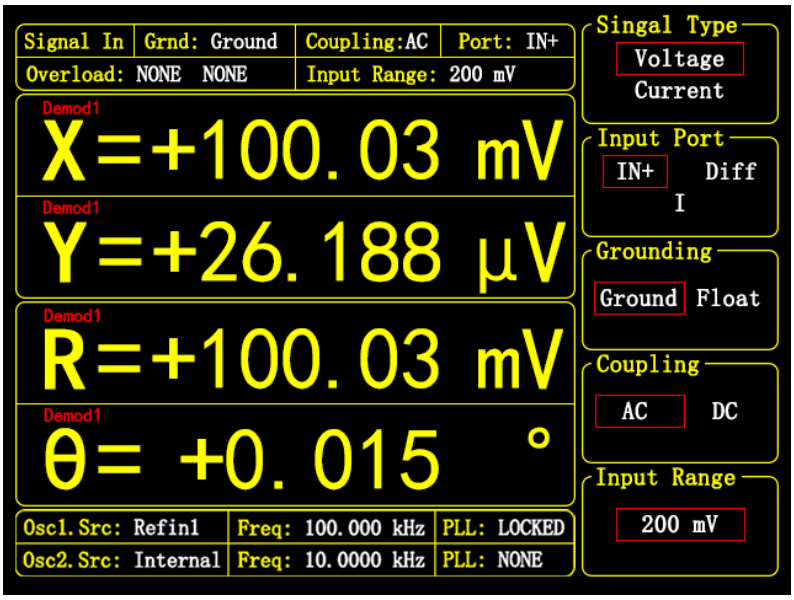


图 121. 修改 Input Range 值的界面

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。