Rapid Eye Analysis v2.0.27
快速眼图分析系统

操作手册

2026 年 10 月 06 日

基于 Python + PySide6 + scikit-rf 的快速眼图分析系统

目 录

第1章 软件概述 7

1.1 主要功能 7

1.2 技术栈 7

1.3 适用场景 7

第2章 系统要求与安装 9

2.1 系统要求 9

2.2 Python 依赖 9

2.3 一键安装（推荐） 9

2.4 手动安装 10

第3章 快速入门 11

3.1 第一张眼图 11

3.2 界面速览 12

3.3 第一次均衡：打开 CTLE 12

3.4 随附演示数据（demo 文件夹） 13

3.5 下一步 13

第4章 软件授权 14

4.1 授权体系 14

4.2 查看 Host ID 16

4.3 激活授权 16

4.4 解除授权 17

4.5 状态栏授权信息 17

4.6 通过 SCPI 远程激活 17

4.7 试用计次异常的处理 17

第5章 界面总览 19

5.1 菜单栏 19

5.2 主窗口 — 眼图分析 20

5.3 S 参数分析窗口 20

5.4 语言切换 20

5.5 帮助与关于 20

第6章 格式转换 22

6.1 支持的转换 22

6.2 操作步骤 22

第7章 级联与去嵌 23

7.1 多路级联 23

7.2 去嵌 24

第8章 分割 26

8.1 操作步骤 26

8.2 点平均平滑 26

8.3 精度说明 27

第9章 TDR 与史密斯圆图 28

9.1 TDR（时域反射） 28

9.2 史密斯圆图（PLTS 对齐优化） 29

9.3 时域 Gating 30

第10章 NRZ/PAM-N 虚拟眼图 31

10.1 基本概念 31

10.2 信号参数设置 32

10.3 操作步骤 35

10.4 FFE 均衡器 36

10.5 RX 滤波器 37

10.6 CTLE 均衡器 38

10.7 RX FFE 均衡器 40

10.8 DFE 决策反馈均衡器 41

10.9 CDR 时钟数据恢复 42

10.10 抖动注入 45

10.11 噪声注入 46

10.12 眼图显示设置 48

10.13 优化采样密度设置 50

10.14 优化算法选择 50

10.15 GPU (CUDA) 加速 52

10.16 流式处理 52

10.17 串扰注入 52

10.18 COM 导入 54

第11章 Expert 模式（管线设计器） 57

11.1 进入与退出 57

11.2 画布操作 57

11.3 节点类型 58

11.4 运行与结果 59

11.5 节点级优化 59

11.6 IBIS / IBIS-AMI 器件模型 61

第12章 光链路仿真与 TDECQ 66

12.1 搭建光链路 66

12.2 光模块参数 66

12.3 TDECQ 评估 67

第13章 SCPI 远程控制 70

13.1 启动 SCPI 服务器 70

13.2 命令总览 70

13.3 S 参数分析窗口控制 89

13.4 眼图典型使用流程 93

第14章 常见问题与故障排除 95

第15章 FEC 前后误码率分析 96

15.1 启用与基本用法 96

15.2 规范预设 96

15.3 结果怎么读 97

15.4 关于码型与计算量 98

15.5 专家模式 98

15.6 SCPI 控制 98

15.7 结果状态与常见问题 99

15.8 MLSE 判决器测量（实测增益） 100

附录 A PLTS 对齐特性概览 102

A.1 PLTS-aligned 默认值 102

A.2 TDR 输出格式 (PLTS plot 等价) 102

A.3 PLTS-equivalent 功能对照 102

A.4 数值一致性 103

A.5 残留差异说明 103

附录 B 术语表 104

第1章 软件概述

Rapid Eye Analysis 是一款面向信号完整性（SI）工程的快速眼图分析系统：从通道 S 参数出发，覆盖 S 参数预处理、NRZ/PAM-N 虚拟眼图、均衡器自动优化、光链路仿真与 SCPI 程控自动化的完整工作流。

1.1 主要功能

- **NRZ/PAM-N 虚拟眼图**：从通道 S 参数直接仿真眼图，完整 TX FFE / CTLE / RX FFE / DFE / CDR 均衡链与自动优化，GPU 加速
- **Expert 模式**：FlexDCA 风格的自由信号链画布，多探针眼图对比（见第11章）
- **光链路仿真**：EO / Fiber / OE 模块与 TDECQ（IEEE 802.3 参考接收机）指标（见第12章）
- **COM 导入**：一键导入 IEEE 802.3 COM 工具结果 CSV 与配置 Excel
- **S 参数处理**：格式转换、多路级联、去嵌、任意比例分割（默认行为与 Keysight PLTS 对齐）
- **TDR 与史密斯圆图**：时域阻抗分析（含时域 Gating）、交互式阻抗轨迹
- **SCPI 远程控制**：450+ 命令程控接口，与 GUI 双向同步（见第13章）
- **中英双语**：界面语言即时切换，双语操作手册与快速入门指南
- **在线更新与意见反馈**：帮助菜单一键检查新版本；写文字、粘贴截图直接发给作者，回复回到软件里（见 5.5）

1.2 技术栈

组件	说明
Python 3.14+	运行环境
PySide6	GUI 框架（Qt 6）
scikit-rf	S 参数读取与处理
NumPy / SciPy	数值计算、FFT、插值
Matplotlib	图表绘制（嵌入 Qt）
CuPy（可选）	GPU 加速眼图计算

1.3 适用场景

- 高速串行链路（PCIe/USB/Ethernet）的 S 参数后处理

- 连接器/线缆/PCB 通道的信号完整性分析
- 虚拟眼图仿真：评估通道对 NRZ/PAM4 等信号的影响
- 测试夹具去嵌与通道分割
- TDR 阻抗剖面分析

第2章 系统要求与安装

2.1 系统要求

项目	要求
操作系统	Windows 10 / 11（64 位）
Python	3.14 或更高版本（64 位）
GPU 加速（可选）	NVIDIA GPU + CuPy（免费默认支持，无需授权）
磁盘空间	约 200 MB（不含 CuPy）

2.2 Python 依赖

包名	用途
PySide6	GUI 框架
scikit-rf	S 参数读取与处理
numpy	数值计算
scipy	FFT、插值、优化
matplotlib	图表绘制
cupy（可选）	GPU 加速

2.3 一键安装（推荐）

软件附带 setup_env.bat 一键环境配置脚本，可自动检测、下载安装 Python 3.14 并安装所有运行时依赖。

1. 双击运行 setup_env.bat。

   → GUI 反馈：脚本自动检测系统中的 Python 3.14（py launcher / PATH / 常见安装路径）

2. 若未找到 Python 3.14，脚本自动从最快镜像源（华为云/npmmirror/官方）下载并安装 Python 3.14（passive 模式，显示进度条）。

3. Python 就绪后，脚本自动调用 runfirst.py 安装 pip 依赖。

   → GUI 反馈：runfirst.py 弹出 tkinter 图形界面，自动探测最快 PyPI 镜像源并安装所有依赖

4. 安装完成后，启动软件：

```
python main.py
```

> **提示：**setup_env.bat 全程无需手动操作。如果 Python 已安装且依赖已就绪，脚本会快速跳过已完成的步骤。

2.4 手动安装

如需手动安装，请按以下步骤操作：

1. 安装 Python 3.14+（64 位），并添加到系统 PATH。
2. 进入项目目录，安装依赖：

```
pip install -r requirements.txt
```

3. 启动软件：

```
python main.py
```

4. （可选）安装 GPU 加速支持：

```
pip install "cupy-cuda12x[ctk]==14.0.1"
```

第3章 快速入门

本章带您在 5 分钟内完成第一张眼图。您只需要一个通道的 S 参数文件（.s4p 或 .s2p，即矢量网络分析仪或电磁仿真导出的 Touchstone 文件）。各术语的通俗解释见附录 B 术语表。

3.1 第一张眼图

第 1 步：启动软件。双击 RapidEyeAnalysis.exe（源码方式运行 python main.py）。软件打开后即为主窗口——眼图分析界面：左侧是参数面板，右侧是图表区。

第 2 步：加载通道文件。点击左上角"输入文件"列表下方的"添加文件"按钮（文件夹图标），选择您的 .s4p 文件。没有现成文件？安装目录 demo/sparams/demo_channel_clean.s4p 是随附的演示通道（见 3.4 节）。

→ GUI 反馈：文件出现在列表中，下方"文件信息"显示端口数与频率范围。

第 3 步：确认端口配对。4 端口文件需要告诉软件哪两个端口构成差分对。默认"交叉 1,3 | 2,4"适用于最常见的端口定义（1/3 为输入对、2/4 为输出对）。若您的文件端口定义不同，在"端口配对"下拉框中选择对应项。.s2p 文件无此步骤。

第 4 步（可选）：设置信号。在"Signal"页中选择信号类型（NRZ 或 PAM4）、数据率（Gbaud）与码型（默认 PRBS7）。初次体验保持默认值即可。

第 5 步：生成眼图。点击左侧面板底部的"生成眼图"按钮。

→ GUI 反馈：按钮变为进度显示；数秒后右侧出现眼图。

第 6 步：读取结果。右侧眼图上叠加的十字标记为眼高（绿色纵线）与眼宽（橙色横线）；图表下方的指标栏显示眼高 (mV)、眼宽 (UI)、COM (dB) 等关键数值。

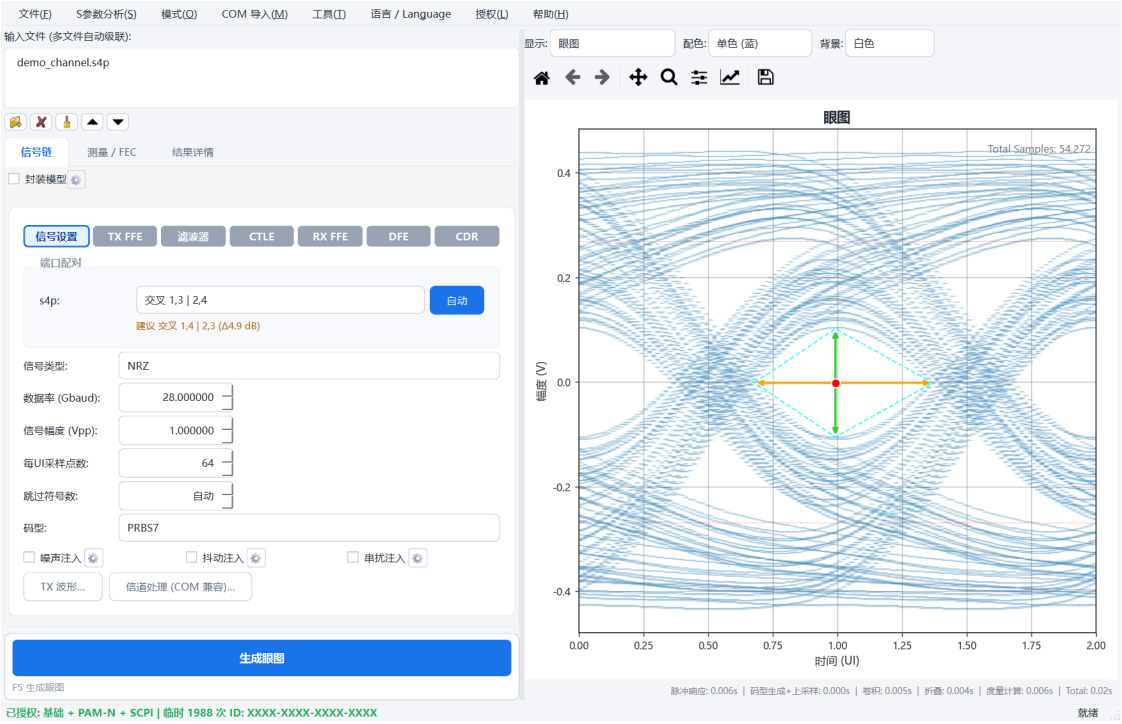

图 3-1 完成第一张眼图后的主窗口

> **提示：**未激活授权时软件处于试用模式，提供 500 次眼图生成（NRZ 与 PAM-N 共享计次）。激活方法见第4章。

3.2 界面速览

区域	位置	作用
输入文件列表	左上	加载 1 个或多个 S 参数文件（多文件自动级联）
功能页签	左侧中部	信号设置 / TX FFE / Filter / CTLE / RX FFE / DFE / CDR 七个配置页（顺序 = 信号链顺序；CDR 在全链均衡后）
生成眼图按钮	左下	按当前配置计算并刷新眼图
眼图显示区	右侧	眼图 / 脉冲响应视图与显示选项
指标栏	右下	眼高、眼宽、COM、VEO 等结果数值
状态栏	窗口底部	授权状态、SCPI 服务状态、计算耗时

3.3 第一次均衡：打开 CTLE

若眼图闭合（高损通道），最快的改善方式是启用接收端连续时间线性均衡器（CTLE）：

1. 点击左侧"CTLE"页签，勾选"启用 CTLE"。

2. 点击"优化"按钮——软件自动搜索最优增益并填入。
3. 回到任意页点击"生成眼图"，观察眼高/眼宽/COM 的提升。

> **提示：**每个均衡器页（TX FFE / CTLE / RX FFE / DFE）都有"优化"按钮，含义一致：以 COM（链路裕量）为目标自动搜索该级均衡器的最优参数。

3.4 随附演示数据（demo 文件夹）

安装目录下的 demo 文件夹提供开箱即用的演示数据，本手册的操作示例均可用它们对照复现：

内容	用途
sparams/demo_channel_clean.s4p	低损通道 — 快速入门第一张眼图（3.1 节）
sparams/lossy_channel_10dB.s4p	高损通道 — 复现 10.3~10.9 均衡器逐级改善插图
sparams/demo_trace.s2p	TDR / 史密斯圆图 / 格式转换演示
com_import/（50G/120G/212G 三套）	COM 一键导入模板：CSV + Excel + 通道（10.18 节）
configs/*.json	"文件 → 加载配置"示例：先加载对应通道，再加载配置，最后生成眼图
scpi_example.txt	SCPI 程控命令序列，可直接对照发送（第13章）

> **提示：**configs 中的配置文件不含通道路径：请先在"输入文件"中添加 README 注明的配套通道，再通过"文件 → 加载配置"载入，然后点击"生成眼图"。

3.5 下一步

- 眼图各参数与均衡器的完整说明 → 第10章
- S 参数预处理（级联 / 去嵌 / TDR 等）→ 第6~9章
- 自由搭建信号链、多探针对比 → 第11章 Expert 模式
- 光链路仿真与 TDECQ → 第12章
- 程控自动化 → 第13章 SCPI 远程控制

第4章 软件授权

本软件采用基于 Host ID 的授权机制。首次运行时为试用模式，提供 500 次试用计次（NRZ 与 PAM-N 眼图共享，SCPI 不含在内）。试用期间 S 参数处理可正常计算与查看，导出结果按每 10 次导出消耗 1 次计次折算；计次用完后仍可计算查看，但不能再导出。如需长期使用，请联系供应商获取授权 Key。

一次生成眼图（无论标准模式还是专家模式）计 1 次；点击优化按钮时软件会**先检查余量再开跑**，优化完成后自动生成的眼图按同样规则计次；COM 结果导入即使带自动优化，整个流程也只计 1 次。

4.1 授权体系

共有四种 Key。**PAM-N、SCPI 与 FEC 是"选件"，必须挂在永久基础 Key 之下才生效**；临时 Key 只往试用计次里加次数，不解锁任何永久能力。

授权类型	NRZ 眼图	PAM-N / COM 导入	SCPI	FEC	计次
试用模式（无 Key）	可用（计次）	可用（计次）	不可用	可用（计次）	500 次
永久基础 Key	可用（不计次）	可用（计次）	不可用	可用（计次）	—
基础 + PAM-N 选件	可用（不计次）	可用（不计次）	不可用	可用（计次）	—
基础 + SCPI 选件	可用（不计次）	可用（计次）	可用	可用（计次）	—
基础 + FEC 选件	可用（不计次）	可用（计次）	不可用	可用（不计次）	—
基础 + 全部选件	可用（不计次）	可用（不计次）	可用	可用（不计次）	—
临时 Key（可叠加）	按底层授权	按底层授权	不解锁	按底层授权	+N 次

注意：临时 Key **不解锁 SCPI**——SCPI 执行型命令只认永久 SCPI 选件，试用次数或临时次数都顶替不了。

提示："可用（计次）"= 该功能在试用/临时次数范围内可以正常使用，每次生成消耗 1 次；次数为 0 时该功能才被拒绝。
提示：GPU / CUDA 加速对所有用户免费默认支持，无需选件授权（仅取决于硬件是否支持 CUDA），因此不在授权状态中单独列出，也不消耗计次。
提示：临时 Key 可与永久 Key 共存。基础 Key 覆盖的功能（NRZ）不消耗临时次数，超出基础 Key 的功能（PAM-N）消耗临时次数。

4.1.1 各功能的授权与计次规则

下表是软件内实际执行的判据，按功能逐条列出。

功能	需要什么	怎么计次
NRZ 眼图生成	基础 Key 或 剩余次数 > 0	无基础 Key 扣 1；有基础 Key 免费
PAM-N 眼图生成	PAM-N 选件 或 剩余次数 > 0	有 PAM-N 选件免费；否则扣 1
专家模式运行管线	同上（按链路信号类型判定）	与标准模式同价，扣 1
优化按钮（CTLE / FFE / DFE / 联合 / TDECQ）	同"眼图生成"，**点击前即检查**	优化本身不计次；优化完成后自动生成的那张眼图按上面规则扣
COM 结果导入（含自动优化）	PAM-N 选件 或 剩余次数 > 0	整个导入流程**合计只扣 1 次**；有 PAM-N 选件免费
S 参数计算 / 查看（级联、去嵌、分割、转换、TDR、史密斯）	无限制	不计次
S 参数结果**导出**（上述窗口的保存按钮 / SCPI SAVE）	基础 Key 或 剩余次数 > 0	**每 10 次导出消耗 1 次**；基础 Key 恒免费；取消或失败不计入
SCPI 执行型命令（INIT / MEAS / OPT / COM 导入 / 管线运行）	**必须有 SCPI 选件**	按上面各功能规则另行计次

功能	需要什么	怎么计次
SCPI 配置 / 查询 / 授权命令	无限制（服务始终可用）	不计次
意见反馈 / 检查更新 / 手册 / 快速入门	无限制	不计次

提示：次数用完不会锁死软件：S 参数照样计算、照样查看，只是不能再导出结果文件，眼图生成也需要授权后恢复。装上任意有效 Key 立即恢复。

注意：只有永久基础 Key、没有 PAM-N 选件且计次已归零时，COM 结果导入不可用——它需要 PAM-N 选件，或者尚有剩余（试用/临时）次数。

4.1.2 被拒绝时会看到什么

- **界面**：弹出授权提示对话框，内含公众号二维码与本机 Host ID，正在编辑的内容不会丢失。
- **SCPI**：错误队列返回 **-203**（计次不足 / 授权拒绝）或 **-200**（缺 SCPI 选件、缺 PAM-N 选件）；查询型命令仍返回空串，不会让客户端挂起。

4.2 查看 Host ID

1. 点击菜单栏 "授权" → "授权管理..."

   → GUI 反馈：弹出"软件授权管理"对话框

2. 对话框中显示本机的 Host ID（唯一标识符），点击"复制"按钮可复制到剪贴板。
3. 将 Host ID 发送给供应商，获取对应的授权 Key。

4.3 激活授权

永久 / 临时授权 Key

在"授权管理"对话框的"永久 / 临时授权 Key"区域输入 Key，点击"激活"。软件自动识别 Key 类型：

- 完整粘贴收到的授权 Key，由软件自动识别永久或临时授权。
- 无需按分组数量判断 Key 类型；请勿手动删减或改写 Key。

→ GUI 反馈：成功：弹出"激活成功"提示

→ GUI 反馈：失败：弹出"激活失败"警告

选件 Key（PAM-N / SCPI / FEC）

在"选件 Key"区域输入 Key，点击"激活"。软件自动识别为 PAM-N、SCPI 或 FEC 选件。

> **注意：**选件 Key 需要先激活基础永久 Key 才能使用。

4.4 解除授权

点击对应区域的"解除"按钮可解除授权。解除基础授权时，PAM-N、SCPI 和 FEC 选件也将一并清除。

4.5 状态栏授权信息

状态	颜色	说明
已授权	绿色	永久 Key 已激活，功能不受限
临时授权	蓝色	临时 Key 已激活，显示剩余次数
试用模式	橙色	试用中，显示剩余次数

状态栏左下角同时显示授权状态和 Host ID，颜色与授权等级对应。

4.6 通过 SCPI 远程激活

SCPI 服务器在程序启动时无条件运行，即使尚未激活 SCPI 选件也能通过 SCPI 远程查询 Host ID 和激活授权 Key。这允许批量部署或机房机器在不开 GUI 的情况下完成授权。

常用命令：

- **LIC:HOST?** — 获取 Host ID
- **LIC:ACT:BASE "key"** — 激活基础 Key
- **LIC:ACT:PAM/RE/SCPI/TEMP "key"** — 激活对应选件或临时 Key
- **LIC:STAT?** — 查询全部授权状态
- **LIC:ACT:LAST?** — 查看上次激活操作的详细结果

详细命令列表见第 10 章 SCPI 远程控制。

4.7 试用计次异常的处理

极少数情况下，升级软件版本后试用计次可能显示为已用完，而实际并未用到那么多次。这类异常源于本机硬件标识在旧版本中的识别偏差，**与您的使用次数无关**。本版本已修正识别逻辑，并具备一次性的自动返还能力。

升级到本版本后启动软件，程序会自动检查计次是否受此问题影响：

- **可确认受影响**——自动把计次恢复到真实的已用次数，无需任何操作，状态栏立即显示恢复后的剩余次数。
- **无法自动确认**——授权对话框（菜单 **帮助** → **授权管理**）会出现一行提示和「一键申请」按钮。点击后会打开意见反馈窗口并**预填好申请所需信息**，您确认内容后自行点击发送

，供应商核实后会签发临时授权 Key 补足次数。

若计次确实是正常使用完的，程序不会做任何改动——这项检查只针对上述异常，且**只会执行一次**。

> **提示：**已激活永久基础 Key 的机器不受此问题影响，也不会看到相关提示。

第5章 界面总览

软件主窗口以眼图分析为中心，S 参数分析功能通过菜单栏打开独立窗口。

5.1 菜单栏

菜单栏从左到右依次为：

菜单	功能
文件	保存/加载配置、最近文件、优化算法（搜索算法、步长、COM Top-N、优化采样密度 16/32/64 点每UI、硬件资源）、初始化、退出
S参数分析	格式转换、级联、去嵌、分割、TDR、史密斯圆图（各开独立窗口，Ctrl+1~6）
模式	标准（Normal）/ 专家（Expert）工作模式切换与「复制 Normal 配置到 Expert」按钮（见第11章）
COM 导入	一键打开 COM 结果导入配置对话框（见 10.18）
工具	启用 CUDA 加速、CUDA 加速状态、SCPI 远程控制开关与状态
语言 / Language	中文 / English 界面语言即时切换
授权	授权管理（激活 / 解除 / 查看 Host ID）
帮助	快速入门指南、操作手册（中/英，F1）、打开日志目录、意见反馈、检查更新、关于

5.1.1 初始化（Reset）

"文件 → 初始化"会同时执行两个操作：

- 清空所有 S 参数分析窗口的输入文件
- **立即将所有控件重置到 PLTS-aligned 默认值**（无需重启程序）

6 个 S 参数分析窗口（格式转换、级联、去嵌、分割、TDR、史密斯）的所有 spinbox/combo/checkbox 都会立即变为 PLTS 默认值。例如：

- TDR：window=plts_nominal、velocity_factor=0.7、dc_method=linear、causality =OFF
- 史密斯圆图：chart_type=Z、Z_ref=50Ω、VSWR 圆=ON
- 级联/去嵌/分割：端口映射=Adjacent (1,3 in / 2,4 out)

5.2 主窗口 — 眼图分析

主窗口为 NRZ/PAM-N 虚拟眼图分析界面，包含左侧控制面板和右侧图表显示区域。左侧面板提供文件选择、信号参数配置、FFE
设置等控件；右侧显示眼图直方图、度量指标和通道频域曲线。

5.3 S 参数分析窗口

通过菜单栏"S参数分析"可打开独立的 S 参数分析窗口（支持同时打开多个）。每个窗口包含左侧控制面板和右侧图表显示区域，支持快捷键 Ctrl+1 ~ Ctrl+6 快速打开对应功能。

快捷键	功能
Ctrl+1	格式转换
Ctrl+2	级联
Ctrl+3	去嵌
Ctrl+4	分割
Ctrl+5	TDR
Ctrl+6	史密斯圆图

5.4 语言切换

软件支持中文和英文两种界面语言，可通过菜单栏"语言"菜单随时切换。

- **菜单路径**：菜单栏 → 语言 → 中文 / English
- **即时生效**：切换后所有界面文本（菜单、标签、按钮、提示等）立即变为对应语言
- **偏好保存**：语言偏好自动保存，重启软件后保持上次选择的语言
- **操作手册**：点击"帮助 → 操作手册"时，将根据当前语言生成对应语言版本的 PDF 手册

5.5 帮助与关于

"帮助"菜单提供：快速入门指南（9 步上手，面向首次试用）、操作手册（中/英 PDF，F1）、打开日志目录（诊断日志所在文件夹，报障时压缩发给技术支持）、**意见反馈**（写文字、Ctrl+V 粘贴截图直接发给作者，作者的回复会回到菜单项上显示未读数）、检查更新、关于（版本号、版权与第三方开源组件许可）。

Rapid Eye Analysis
v2.0.23
快速眼图分析系统
功能: 格式转换 · 级联 · 去嵌 · 分割 · TDR · 史密斯圆图 · 眼图
基于 Python + PySide6 + scikit-rf
© 2026 Rapid Eye Analysis. 保留所有权利。
第三方开源组件...
确定

图 5-1 关于对话框

第6章 格式转换

格式转换功能支持 S 参数文件的多种转换操作，通过菜单栏 "S参数分析" → "格式转换" 或快捷键 Ctrl+1 打开。

6.1 支持的转换

- **数据格式转换**：MA（幅度/角度）、DB（分贝/角度）、RI（实部/虚部）之间互转
- **频率单位转换**：Hz、kHz、MHz、GHz 之间互转
- **端口提取**：从多端口 S 参数文件中提取指定端口子集
- **S4P 差分混合模式转换**：将 4 端口单端 S 参数转换为差分/共模混合模式参数（SDD、SDC、SCD、SCC）
- **端口顺序调整**：重新映射输出端口与原始端口的对应关系，适用于不同 VNA 厂商的端口约定差异

6.2 操作步骤

1. 在左侧面板选择源 S 参数文件（支持 .s1p ~ .s4p 等 Touchstone 格式）。
2. 选择目标格式和参数。
3. 点击"转换"按钮执行转换。
4. 在右侧图表预览结果，满意后点击"保存"导出转换后的文件。

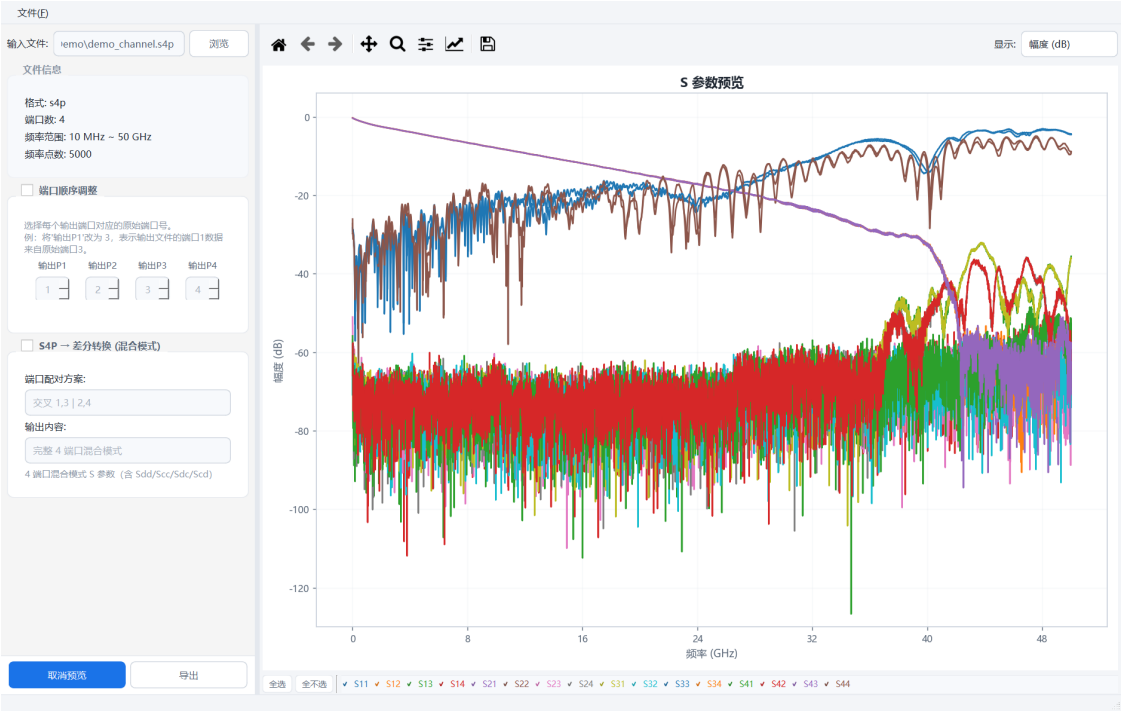

图 6-1 格式转换界面 — S4P 差分混合模式转换

第7章 级联与去嵌

7.1 多路级联

级联功能通过 T 矩阵（Scattering Transfer Matrix）连乘实现多段网络的串联。支持自动频率插值对齐。

1. 添加需要级联的 S 参数文件（按连接顺序排列）。

2. 使用上/下移动按钮调整级联顺序。

3. 对于 4 端口网络，如需调整端口分组，勾选"端口顺序调整"并指定输入侧和输出侧端口号（默认：输入 P1,P3 / 输出 P2,P4）。

4. 点击"级联"按钮执行计算。

5. 右侧显示级联结果的频域曲线，可保存为新的 S 参数文件。

> **提示：**级联运算精度极高（~1e-16），不会引入明显的数值误差。当各文件频率点不同时，软件自动使用三次样条插值进行频率对齐。

7.1.1 s2p / s3p / s4p 混合级联

级联工具及眼图"输入文件"列表均支持单端与差分 S 参数任意类型、任意顺序混合级联：s4p（差分 4 端口）按端口配对提取差分 Sdd、s3p（单端↔差分）按差分对约简为 [单端, 差模]、与 s2p（单端 2 端口）在 2 端口差分域按列表顺序级联，结果为 2 端口网络。级联工具中，s2p 段方向由"s2p 端口(In/Out)"设置，s4p 段由端口顺序调整设置。

- **Reverse 后续网络**：勾选后，列表中第二段及之后的网络在级联前先做端口翻转（输入/输出互换），等价 PLTS Embedding 的 "Reverse" 选项。适用于两段夹具"背靠背"方向相对的场景。

图 7-1 级联界面 — 两段 S4P 级联及差分转换结果预览

7.2 去嵌

去嵌功能用于从被测通道中移除已知的测试夹具或适配器的影响，支持左侧去嵌、右侧去嵌和双侧去嵌三种模式。

模式	说明	数学原理
左侧去嵌	移除输入端（TX 侧）的夹具	$T_result = T_fixture^{-1} \cdot T_DUT$
右侧去嵌	移除输出端（RX 侧）的夹具	$T_result = T_DUT \cdot T_fixture^{-1}$
双侧去嵌	同时移除两端的夹具	$T_result = T_L^{-1} \cdot T_DUT \cdot T_R^{-1}$

1. 选择被测 DUT（含夹具）的 S 参数文件。
2. 选择夹具的 S 参数文件（左侧/右侧/双侧）。
3. 对于 4 端口网络，如需调整端口分组，勾选"端口顺序调整"并指定输入侧和输出侧端口号。该设置同时应用于 DUT 和夹具。
4. 选择去嵌模式，点击"去嵌"按钮。

图 7-2 去嵌界面 — 双侧去嵌及差分转换结果预览

第8章 分割

分割功能用于将一个长通道按任意比例切分为两段。2 端口使用 ABCD 矩阵分数幂，4 端口使用 WCM T 矩阵分数幂和特征值追踪算法。

8.1 操作步骤

1. 选择需要分割的 S 参数文件。
2. 对于 4 端口网络，如需调整端口分组，勾选"端口顺序调整"并指定输入侧和输出侧端口号（默认：输入 P1,P3 / 输出 P2,P4）。
3. 设置段数（2~10 段）。默认为 2 段（二分）。段数增加时自动生成对应数量的比例输入框。
4. 设置各段分割比例。点击"均分"按钮可将比例自动设为等分。各比例之和应等于 1.0。
5. 点击"分割"按钮执行计算。
6. 右侧显示分割后各段的频域曲线，可分别保存。

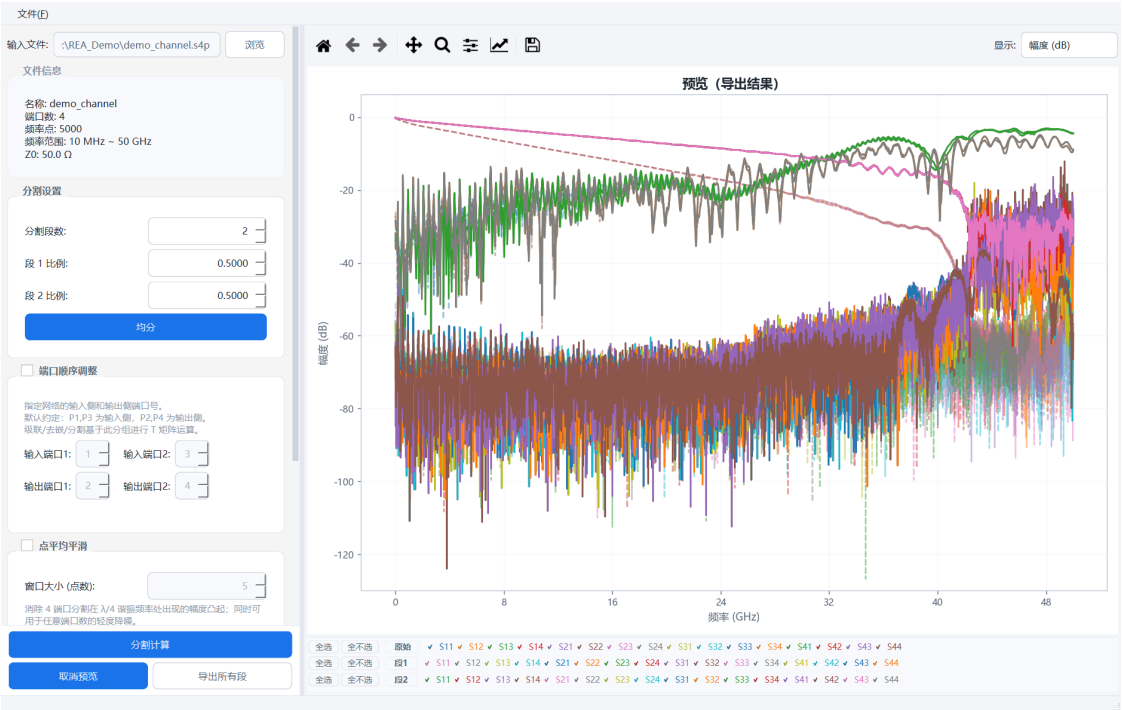

图 8-1 分割界面 — 4 端口 S 参数二等分及差分转换结果

8.2 点平均平滑

分割结果可能在某些频率点存在数值波动（特别是 4 端口分割在谐振频率附近）。勾选"点平均平滑"可对分割结果进行滑动窗口平均平滑处理。

- **窗口大小**：3~51 点（奇数），默认 5 点
- **作用**：对 S 参数幅度和相位分别做滑动平均，减小高频噪声和谐振毛刺

提示：平滑仅对显示和导出结果生效，不影响分割算法本身。窗口过大可能导致曲线细节丢失。

8.3 精度说明

端口数	算法	还原精度
2 端口	ABCD 矩阵分数幂	~2e-2
4 端口	WCM T 矩阵 + 匈牙利算法特征值追踪	~4e-13（机器精度）

注意：4 端口分割在特征值相位经过奇数倍 π 处可能出现 <2% 的幅度凸起，这是 λ/4 谐振的物理特性，不是算法缺陷。

第9章 TDR 与史密斯圆图

9.1 TDR（时域反射）

TDR 分析通过对 S11 参数进行 IFFT 变换，得到时域阻抗剖面，用于定位通道中的阻抗不连续点。所有默认参数均与 Keysight PLTS 对齐，开箱即得 PLTS 等价行为。

支持 13 种窗函数：plts_nominal（默认，PLTS Nominal）、plts_flat、plts_fast、exponential_plts、gaussian、kaiser、hamming、hanning、blackman、chebyshev、plts_custom、exponential、矩形。

点击"窗函数设置"按钮可打开 PLTS 兼容的窗函数设置对话框。内置 4 种 PLTS 预设：Flat Response (TD 0.80)、Nominal (TD 0.50, DEFAULT)、Fast Rise Time (TD 0.20)、Custom，并实时显示 Step Rise Time 和 Impulse Width。

显示模式：6 种 PLTS 等价格式 — Impedance (Ω, 默认 STEP_IMPEDANCE_NS)、Voltage (V, STEP_VOLTS_NS)、Step (Γ, STEP_REAL_NS)、LogMag (dB, STEP_LOGMAG_NS)、Impulse (IMPULSE_REAL_NS)、Impulse LogMag (IMPULSE_LOGMAG_NS)。

DC 外推：5 种方法 — Auto (linear, PLTS 默认)、Auto with PNA Method (circle)、Even-Poly (REA legacy)、First Re(S11) (SE T11 对齐)、Manual (用户指定)。

高级 PLTS-equivalent 工具：Correct Impedance Profile (Goldberg 层剥离)、One-way Display、Bandwidth Extension (AR 频谱外推)、Step Smoothing σ、Frequency Band Limiting (PLTS ImportFile freqStart/Stop)、Manual DC 值。

4 端口 S 参数加载后，软件自动检测差分模式（Sdd），并将参考阻抗设为 Z0=100Ω。

1. 选择 S 参数文件。
2. 选择窗函数类型并配置参数（或使用预设）。
3. 点击"计算 TDR"按钮。
4. 右侧显示阻抗 vs 时间/距离曲线。

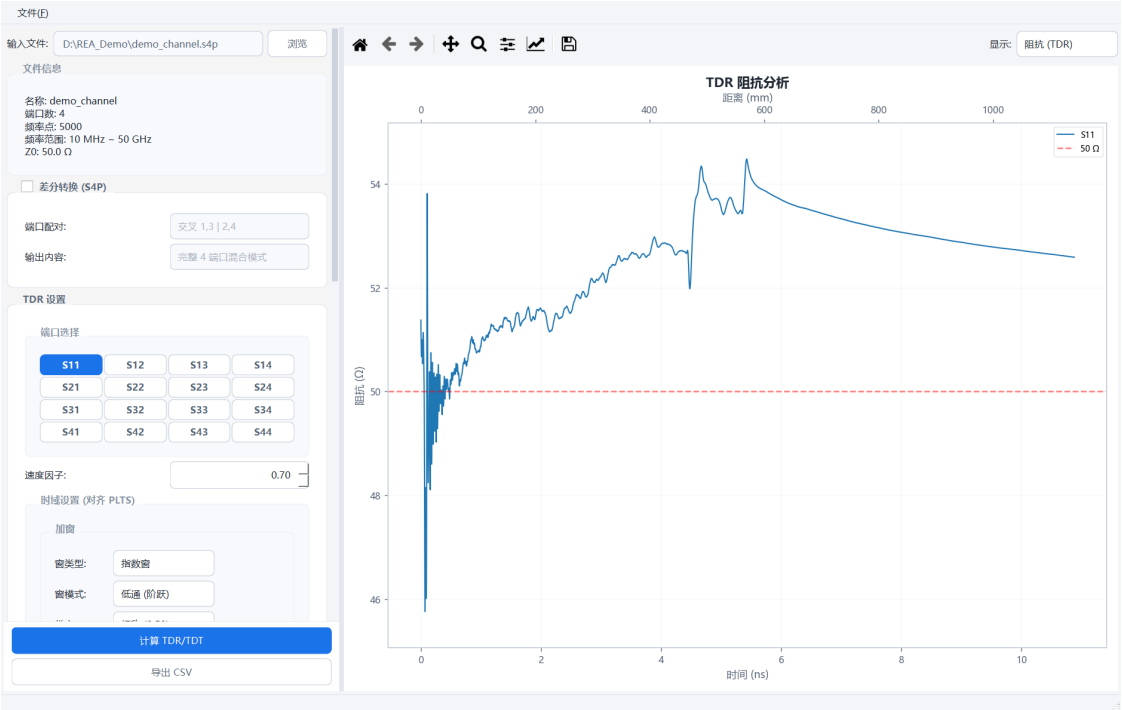

图 9-1 TDR 界面 — 4 端口差分阻抗分析（含距离轴）

9.1.1 速度因子与距离显示

速度因子（Velocity Factor）用于将 TDR 时间轴转换为物理距离。默认值 0.70（约为 FR-4 介质中的信号传播速度比）。

- **速度因子**：范围 0.01~1.00，表示信号传播速度与光速的比值。对应 SCPI 命令：CONF:TDR:VEL
- **显示模式**：可在阻抗（Impedance）、阶跃响应（Step）和脉冲响应（Impulse）之间切换。反射参数（S11/S22）默认显示阻抗，传输参数（S21/S12）默认显示脉冲响应。

9.1.2 CSV 导出

点击"导出 CSV"按钮可将 TDR 计算结果导出为 CSV 文件。文件包含时间轴（秒）、距离轴（米）和阻抗/响应数据列。

9.2 史密斯圆图（PLTS 对齐优化）

史密斯圆图使用自定义的 Matplotlib 组件，与 PLTS Smith 圆图数值字节级一致（Re/Im(Γ), Re/Im(Z), VSWR 全部 machine precision 对齐）。支持交互式缩放、平移、双击重置。

图表类型 (PLTS chart_type): Z 阻抗（默认）/ Y 导纳 (admittance/inverted Smith), 通过下拉菜单切换。

参考阻抗 Z_ref (PLTS Port Reference Impedance): 默认 50Ω SE，可调 1-10000Ω。提供 50/75/100/150Ω 快捷按钮。启用差分模式时自动切换到 100Ω (PLTS diff 默认)，关闭时自动切回 50Ω。

VSWR 等高圆 (PLTS draw_vswr): 可开关 (默认开)，显示 1.5/2/3/5 VSWR 等高线。

Hover Marker: 鼠标悬停轨迹时浮窗显示完整 PLTS 风格读数 — freq, Z=R+jX (Ω), Γ=Re+jIm, |Γ| dB, VSWR, Return Loss。

1. 选择 S 参数文件 (支持多文件叠加, 不同颜色)。
2. 选择要显示的 S 参数 (S11/S22/S12/S21 + 4-port 混合模式)。
3. 调整图表类型 / Z_ref / VSWR 显示。
4. 圆图自动绘制阻抗轨迹，悬停查看详细数值。

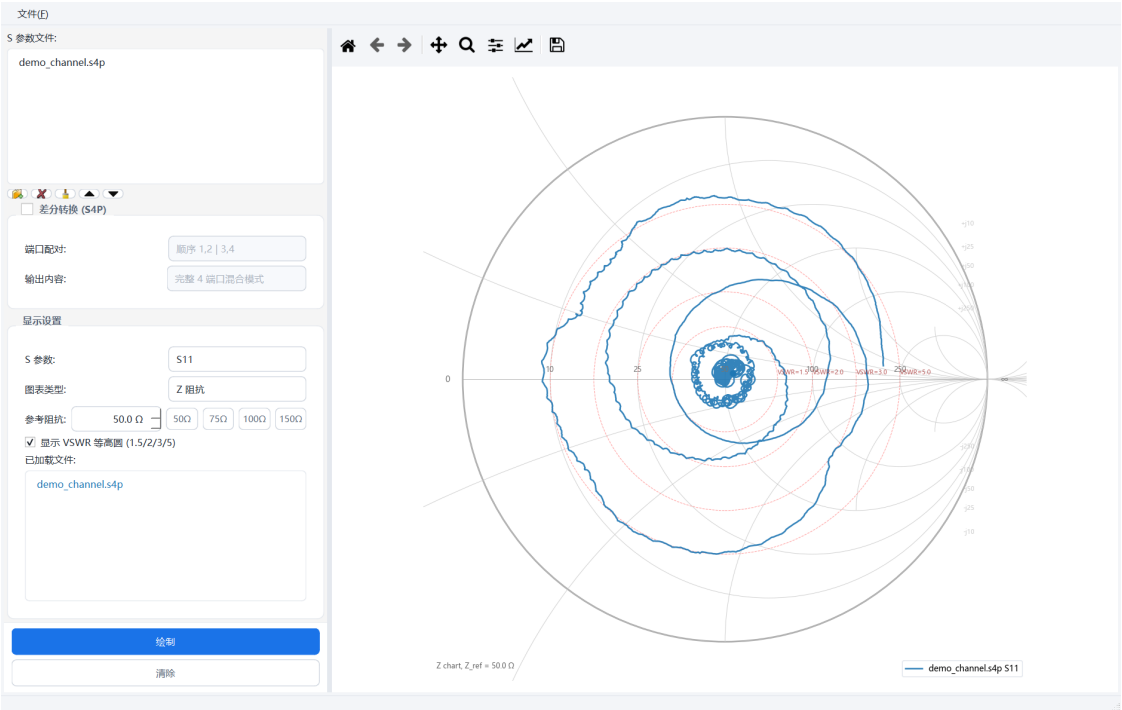

图 9-2 史密斯圆图界面 — Sdd12 阻抗轨迹

9.3 时域 Gating

Time-Domain Gating（时域加门）在时域中保留或移除某段时间区域的响应， 再变换回频域, 用于剔除夹具、连接器等不关心区段的反射。等价 PLTS Tools → Time-Domain Gating。

操作: 在 TDR 页左侧「Time-Domain Gating」分组勾选启用, 设置 gate 的起止时间。

- **Bandpass** (默认): 保留 gate 区间内的响应 (= PLTS Bandpass)。
- **Bandstop**: 移除 gate 区间内的响应 (= PLTS Notch)。

SCPI 对应命令为 CONF:TDR:GATE:STATe/TYPE/STARt/STOP (见第13章)。

第10章 NRZ/PAM-N 虚拟眼图

虚拟眼图是本软件的核心功能，通过 PRBS 码型与通道 S 参数卷积来模拟高速串行信号经过通道后的眼图，评估通道的信号完整性。

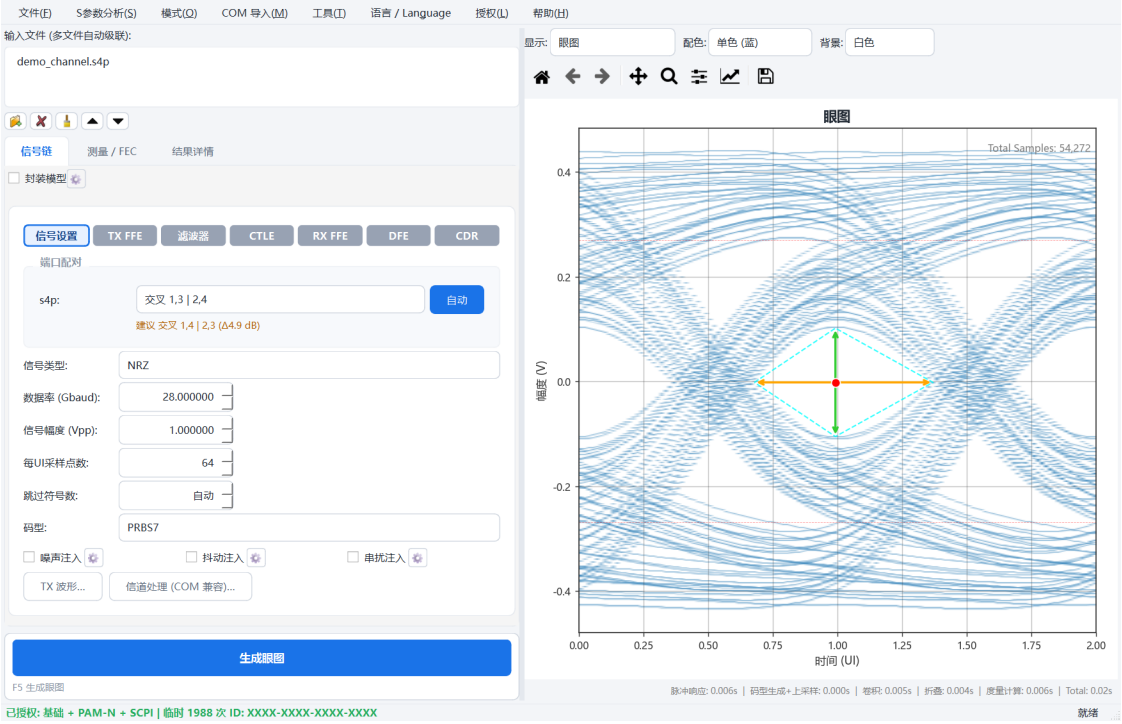

图 10-1 眼图分析主界面 — 信号设置页

10.1 基本概念

左侧按任务分为"信号链"、"测量 / FEC"和"结果详情"三个页签。生成、暂停和停止操作固定在底部，滚动参数或查看长结果时仍可直接操作；按 F5 可生成眼图。信号链阶段按钮用于切换参数页，启停由页内的"启用"复选框控制。FEC 编码预设、物理通道数和附加 BER 在"测量 / FEC"页统一设置；附加 BER 留空采用预设默认值。

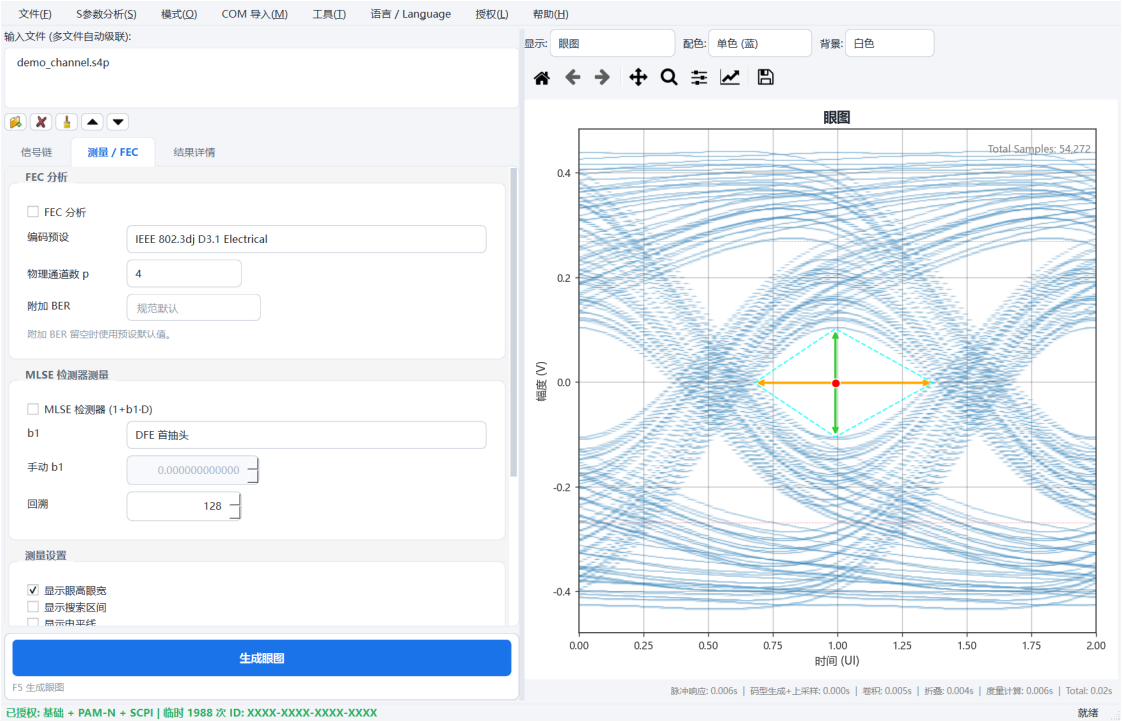

图 10-1a 测量 / FEC 设置与固定生成操作栏

- **码型**：支持 PRBS-7 到 PRBS-31、SSPR（OIF-CEI，锁定 NRZ）及 SSPRQ（IEEE 802.3，锁定 PAM4）码型。
- **自定义码型**：支持加载自定义码型文件（.txt），文件中以空格/换行/逗号分隔的 0/1 比特序列。安装目录下 _internal/examples/ 提供了示例文件（如 PRBS9.txt）可供参考。
- **信号类型**：NRZ（2 电平）和 PAM-N（N 电平，N=3/4/5/6/7/8）。PAM-N 需要 PAM-N 选件或临时授权。
- **Gray Code**：可选的 Gray 编码，使相邻电平仅差 1 bit。仅对 PAM-4/PAM-8 等 2 的幂次阶数有效。SSPRQ 码型内置 Gray 编码，不受此开关影响。
- **眼图度量**：眼高（Eye Height）、眼宽（Eye Width）、使用 1/99 百分位统计避免过零异常值。

10.2 信号参数设置

在左侧控制面板中设置以下信号参数：

10.2.1 基本参数

- **信号类型**：NRZ 或 PAM-N（N=3/4/5/6/7/8）
- **波特率**（Gbaud）：范围 0.1~250.0，表示每秒传输的符号数。
- **PRBS 阶数和码型**：PRBS-7 到 PRBS-31、SSPR、SSPRQ、自定义码型
- **每符号采样数**

10.2.2 端口配对（s2p / s3p / s4p）

眼图信号面板顶部的"端口配对"组按已加载 S 参数文件的类型给出相应端口配置（不再需要单独的 TX/RX 端口行）：

- **s2p（单端 2 端口）**：方向选择 1→2 或 2→1（镜像 S11↔S22）。对应 SCPI：CONF:S2P:DIR 0|1
- **s3p（单端↔差分）**：每个 s3p 文件独立配置差分对 [(1,2)/(2,3)/(1,3)] 与方向（单端→差分 / 差分→单端）。对应 SCPI：CONF:S3P:PAIR / CONF:S3P:DIR
- **s4p（差分 4 端口）**：端口配对方案（默认交叉 13 进 / 24 出），4 端口经差分 Sdd 提取为 2 端口。对应 SCPI：CONF:DIFF:PAIR。右侧"**自动**"按钮按低频 Sdd21 直通性减自反射（|Sdd11|、|Sdd22|）评分猜测配对：正确配对直通≈0 dB 且回损好；把同侧端口拆开的错配只剩耦合；互不耦合且对称的两条线，"线 B 反向"的配对与正确配对代数等价（打平时按约定优先交叉）。建议与当前选择不一致时标签变黄。对应 SCPI：CONF:DIFF:PAIR AUTO / CONF:DIFF:PAIR:AUTO?

10.2.3 多文件混合级联（s2p/s3p/s4p 任意顺序）

"输入文件"列表可加载多个 S 参数文件并自动级联，支持 s2p、s3p、s4p 任意类型、任意顺序混合：s4p 段按端口配对提取差分 Sdd、s3p 段按差分对约简为 [单端, 差模]、与 s2p 段在 2 端口差分域按列表顺序级联。

> **提示：**SCPI 多文件级联：先 CONF:FILE 载入首个文件，再 CONF:FILE:ADD 追加其余；RUN
> 与全部均衡优化器（CTLE/FFE/DFE/联合/浮动/光链）使用同一建链语义。

10.2.4 信号幅度（Vpp）

- **信号幅度**（Vpp）：范围 0.1~5.0 V，默认 1.0 V。控制发射信号的峰峰值电压

10.2.5 上升/下降时间

在“信号”页点击“TX 波形”设置发送端边沿与高斯滤波；点击“信道处理”设置插值、因果性校正与截断阈值。

- **上升时间**（UI）：控制 TX 上升沿过渡时间，界面范围 0.00~0.50 UI，采用 20%-80% 定义（指定时间覆盖幅度从 20% 到 80% 的区间，实际 0%-100% 斜坡总长 = 设定值 / 0.6）。设为 0 时为理想阶跃；设为正值时使用线性斜坡代替理想跳变，模拟发射机有限带宽引起的边沿变缓效果。
- **下降时间**（UI）：控制 TX 下降沿过渡时间，参数范围和定义与上升时间相同。默认值 0.00（理想阶跃）。可以与上升时间设置不同的值以模拟非对称边沿。

10.2.6 判决参数 / COM 噪声预算子窗口

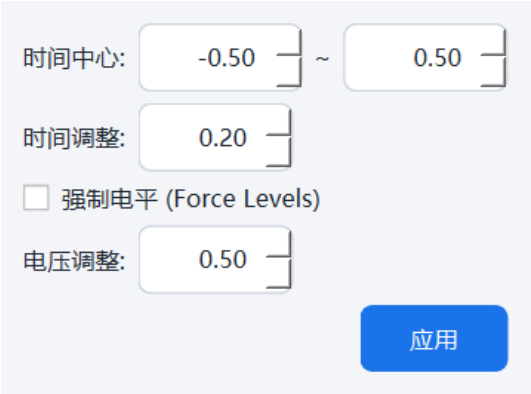

图 10-2 判决参数子窗口

度量面板下方提供"判决参数"与"COM 噪声预算"两个按钮，各自弹出独立的无模态子窗口（不占用眼图区域，可与眼图并排查看）：

- **判决参数**：Time Center（判决点时间搜索范围）、Time Adjust、Force Levels（强制电平）、Voltage Adjust；"应用"按当前条件重搜判决点。
- **COM 噪声预算**：A_DD、DER_0、η_0、σ_RJ、SNR_TX、σ_N，以及"预算噪声→眼图"复选框；"应用"重算 COM/VEO 指标。

> **提示**："预算噪声→眼图"（默认开启）将 COM 统计噪声预算（η_0/σ_N/A_DD/SNR_TX/σ_RJ）派生注入显示眼，使 VEO/SNR_REA 反映完整噪声预算并向 SNDR_93A 收敛；仅影响显示，COM_93A 数值不变，均衡优化器不受影响。SCPI：CONF:NOIS:BUDGetmap。

Force Levels（强制电平）功能允许手动指定各信号电平的电压值，覆盖自动判决电平检测。位于"判决参数"子窗口中。

- 勾选"Force Levels"后出现对应数量的电压输入框（NRZ 为 2 个，PAM-4 为 4 个，以此类推）
- 手动输入各电平电压值，眼图将使用指定电平计算眼高/眼宽
- 取消勾选则恢复自动电平检测

> **提示**：Force Levels 适用于需要与特定协议规范对齐的判决电平场景，或当自动检测的电平不符合预期时。

- **信道扰动 / AC 共模（COM 4.x）**：同一子窗口内的第二组参数，与 COM 4.x 配置同名，COM 导入自动填入，全零 / κ=1 即不施加（结果逐位不变）。**Txp/Txn/Rxp/Rxn 偏斜（ps）**：4 端口信道在混合模式变换前对各单端端口加相位 e^(j2πfτ)（COM Txpskew 等），p/n 等量偏斜只是纯延迟，差量偏斜产生模式转换与 ISI；**κ1/κ2**：差模反射 Sdd11/Sdd22 的缩放（COM kappa1/kappa2，0 = 忽略 tp0/tp5 处反射），封装级联前施加；**AC_CM_RMS（mV）与ACCM f_max（GHz，0 = fb）**：TX 侧 AC 共模噪声源，经 4 端口 Sdc21 泄漏为差模再过 RX 链，度量 σ_ACCM 按 COM 4.14 与 σ_N 方和根合并（FETC:EYE:COM? 的

sigma_ACCM_mV），"预算噪声→眼图"开启时按同口径渲染进眼（N1 位置的带限共模白噪，一侧 PSD $2A^2/f_{max}$ 平坦到 f_max）。SCPI：CONF:CHAN:SKEW / CONF:CHAN:KAPPa / CONF:NOIS:ACCM。

- **COM 脉冲响应截断阈值 / 串扰 ICN（COM 4.x）**：COM 兼容行新增**截断阈值**（COM 配置 Impulse response truncation threshold，缺省 1e-3）：信道脉冲响应最后一个 |h| > 峰值×阈值 的样本之后置零（COM 丢弃），0 = 不截断；COM 导入按配置填入并镜像到 Expert 源节点。串扰子窗口新增 **ICN 幅度 A_ft/A_nt**（COM 4.x，仅用于 ICN 报告，0 = 同各路径幅度 A_fe/A_ne，不改攻击者波形）。噪声预算子窗口新增 **ICN (CSV, mV)**：COM 导入自动填入结果 CSV 的 ICN_mV，未加载攻击者文件时以 σ_XT = ICN·σ_x 的高斯近似进 COM 度量（指标面板标注 XT … (ICN@CSV)），"预算噪声→眼图"开启时按同口径渲染进眼；加载攻击者文件后由真实串扰接管。COM 导入同时解析 CSV file_names 列出的攻击者基名（thru 之后，类型按文件名含 fext/next），在 CSV 与 victim 目录找到即预填/自动登记。SCPI：CONF:CHAN:IRTRunc / CONF:NOIS:ICN / CONF:XTALK:ICN:AMPL。
- **SNR_TXwC0（COM 4.x）**：噪声预算子窗口 SNR_TX 下方的复选框。开启时 σ_TX = (L−1)·A_s/c0/R_LM·10^(−SNR_TX/20)，即发射噪声参考回去加重前的满摆幅（TX FFE 主抽头 c0 < 1 时噪声不随加重缩小，更保守）；关闭为 802.3 式 93A-30。REA 折算为有效 SNR_TX′ = SNR_TX + 20·log10(c0)，度量 σ_TX 与预算眼的逐符号幅度噪声同步跟随，未启用 TX FFE 时无影响；TX FFE 优化内 c0 冻结在当前抽头（COM 逐候选取 c0），优化完成后按新抽头重算。COM 导入按配置 SNR_TXwC0 填入并镜像到 Expert 源节点。SCPI：CONF:NOIS:SNR_TX:WC0。
- **MLSE 对拍基准（COM 4.x）**：COM 开启 MLSE 时结果 CSV 的 COM_dB = COM_orig + ΔCOM，ΔCOM 是 Annex 178A 的判决器解析增益（不是波形仿真）。REA 不建模判决器，其 COM_93A 对应 COM_orig。导入摘要与指标面板的 COM_csv 行会并列显示 COM_orig 与 ΔCOM，FETC:EYE:COM? 在原 CSV_COM_dB / REA_minus_CSV_dB 之外新增 CSV_COM_orig_dB、CSV_delta_COM_dB、CSV_MLSE 与 REA_minus_CSV_orig_dB；通过/失败仍以 CSV_COM_dB 为准，算法一致性看 REA_minus_CSV_orig_dB。

10.2.7 Level Ratio（电平间距比例）

Level Ratio 用于 PAM-N 信号中自定义各电平之间的间距比例。默认为等间距（各比例相同）。勾选"Level Ratio"后弹出设置对话框，可为每个电平间隔设置不同的比例值。

- 比例值范围：0.1~10.0，各值的相对大小决定电平间距分配
- 确认后自动重新生成眼图。取消勾选则恢复等间距模式

10.3 操作步骤

1. 在文件选择器中选择 S 参数文件（.s2p 或 .s4p）。
2. 按 10.2 节所述设置信号参数。
3. （可选）配置均衡器和噪声/抖动参数。
4. 点击"生成眼图"按钮。

→ GUI 反馈：右侧显示眼图直方图和度量指标（眼高、眼宽等）

为直观展示均衡器的作用，10.4~10.9 各页截图取自同一个高损通道（约 10 dB @ Nyquist，PAM4 53.125 GBaud，即随附的 demo/sparams/lossy_channel_10dB.s4p，您可亲手对照复现）：下图为未启用任何均衡器的基线眼图——眼睛几乎闭合；后续每一页在前一页基础上多启用并优化一级均衡器，可逐级对比改善效果。

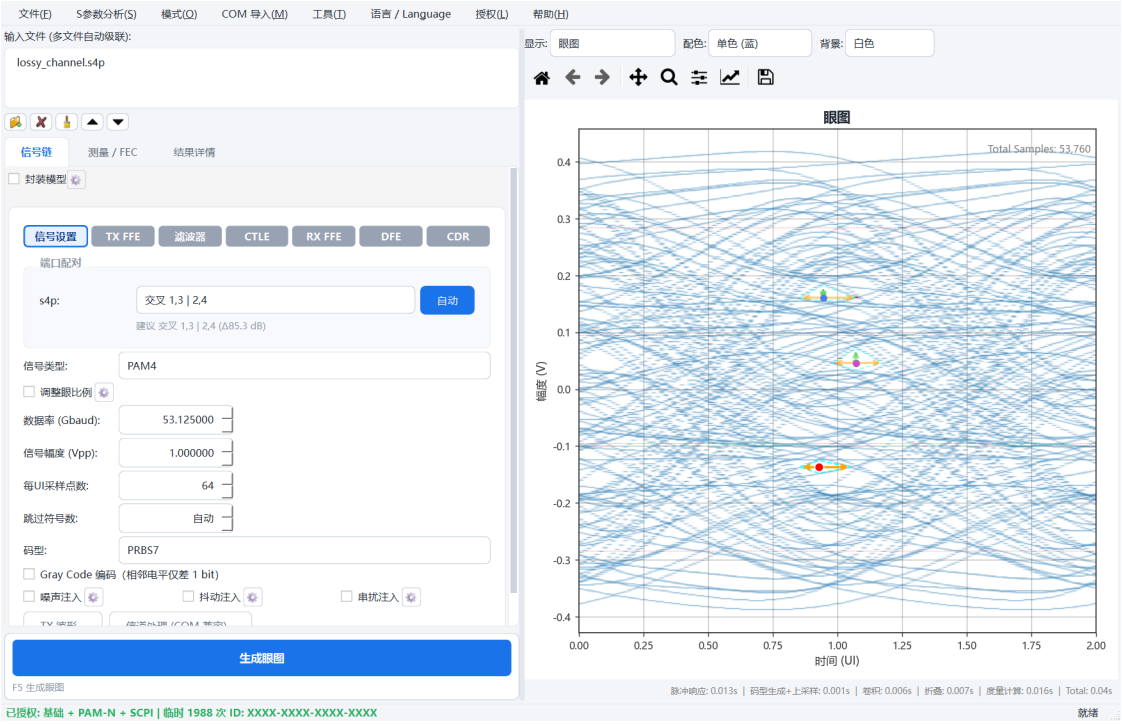

图 10-3 未均衡基线眼图 (高损通道 PAM4) — 眼几乎闭合

10.4 FFE 均衡器

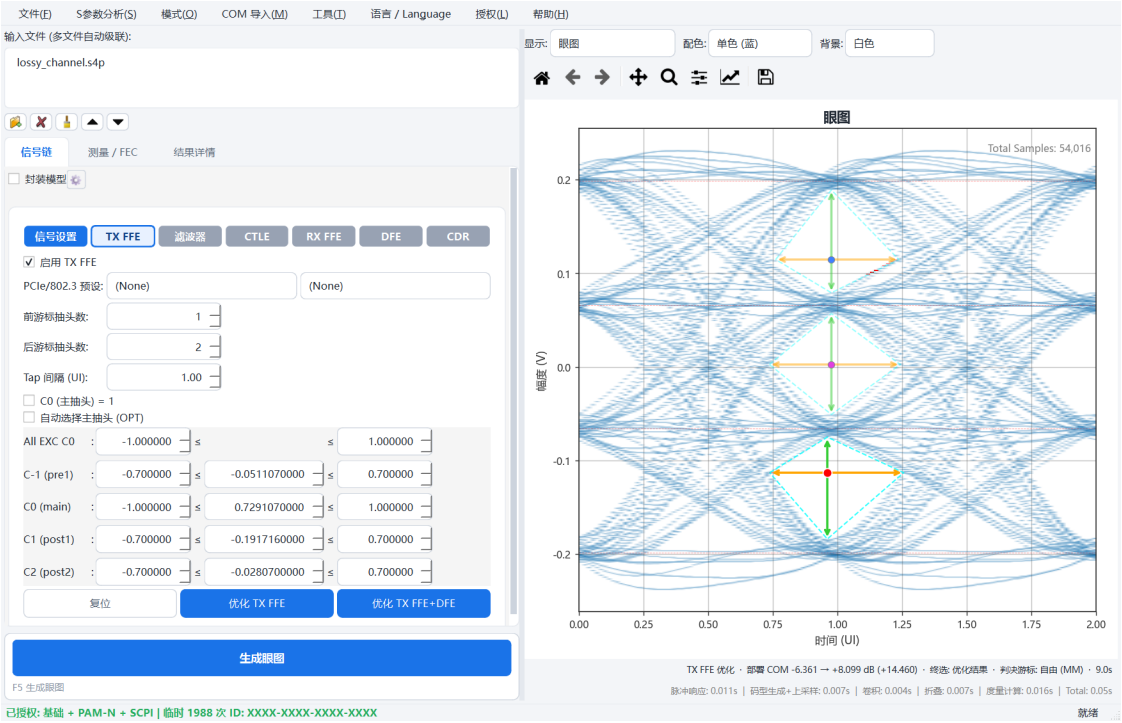

图 10-4 TX FFE 配置页 — 启用并优化后 (对比图 10-3 基线)

支持前馈均衡器（FFE），可手动设置抽头系数、选用协议预设或使用自动优化功能。

- **手动设置**：直接输入 pre-cursor 和 post-cursor 抽头数及系数
- **优化范围**：TX FFE、RX FFE 和 DFE 页默认显示系数；勾选"显示优化范围"可展开上下限。折叠显示不会改变限值或优化结果。

SCPI 可通过 DISP:TXFFE:BOUN、DISP:RXFFE:BOUN、DISP:DFE:BOUN 加 ON / OFF 控制同一展开状态，加 ? 可回读 GUI 当前状态。

- **协议预设**：内置 PCIe（Gen1~7）、USB4 / USB4v2、802.3 TX 加重等 TX FFE 预设，采用"协议族 → 具体配置"两级菜单。选择预设自动填充抽头数、系数及各抽头上下限。
- **自动优化**：软件以 COM（链路裕量）为目标自动搜索最优 FFE 系数。默认使用 Nelder-Mead 搜索算法，也可在"文件 → 优化算法"切换为网格搜索（见 10.14）。优化在各抽头的上下限（tap bounds）范围内进行——未设定时的默认界为主抽头 ±1.0、其余抽头 ±0.7（以主抽头为 1 计；802.3 发射均衡器的 c(−1) 限值折算约 0.74）——预设、用户或 COM 导入设定的界均被优化器严格遵守。

10.5 RX 滤波器

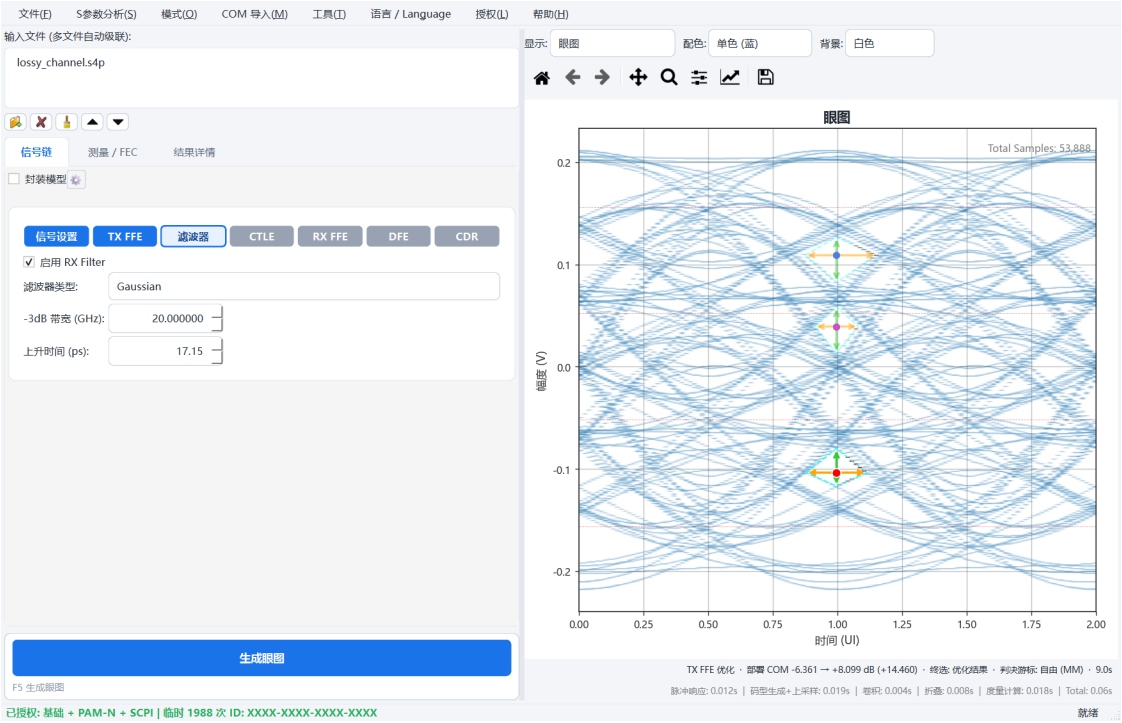

图 10-5 RX Filter 配置页 — 启用带宽限制滤波器后

支持在接收端添加滤波器，模拟接收机的带宽限制。滤波器类型包括 Gaussian、Bessel-Thomson、Butterworth 和 RC。

- **Gaussian 滤波器**：额外提供"上升时间 (ps)"输入框，与 -3dB 带宽自动联动。数学关系：BW_3dB × T_rise = 0.343（10%-90% 上升时间）。修改带宽时上升时间自动更新，修改上升时间时带宽自动更新。
- **其他滤波器**：仅需设置 -3dB 带宽。

10.6 CTLE 均衡器

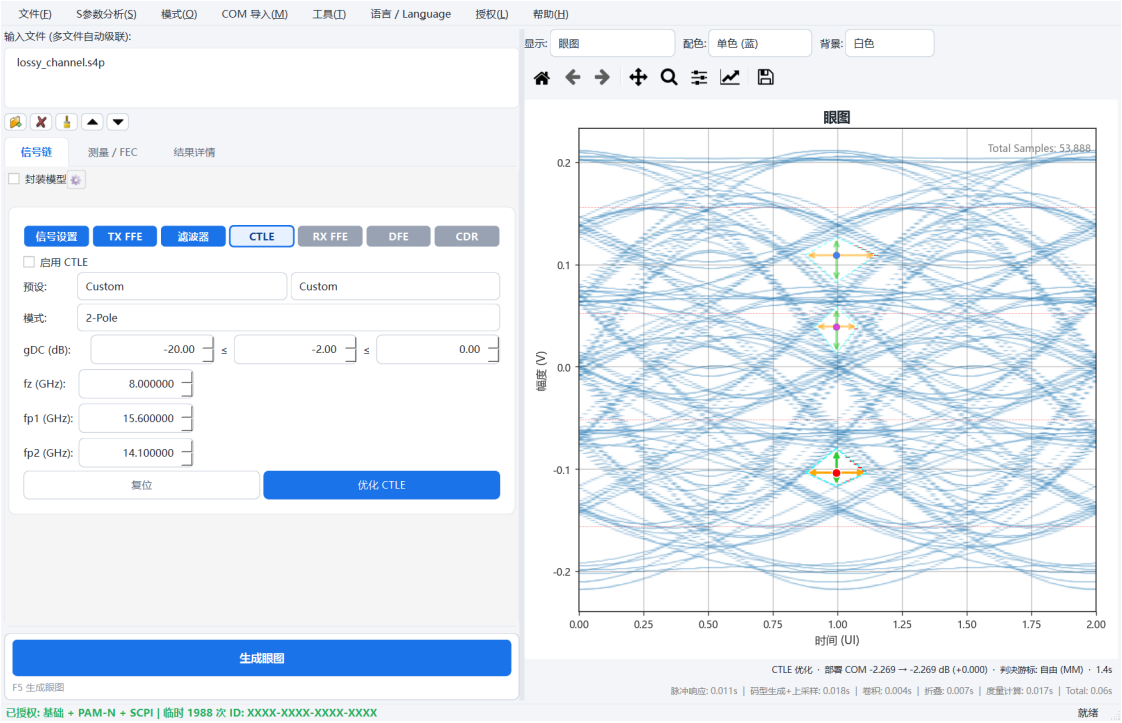

图 10-6 CTLE 配置页 — 启用并优化增益后, 眼睛明显张开

支持连续时间线性均衡器（CTLE），作用于 RX Filter 之后、RX FFE 之前。信号处理链为：Channel → TX FFE → RX Filter → CTLE → RX FFE。

CTLE 传递函数基于 IEEE 802.3 / OIF-CEI 标准，支持三种模式：

- **2-Pole 模式**（OIF CEI-28G）：H(f) = 10^(gDC/20) · (1+jf/fz) / ((1+jf/fp1)(1+jf/fp2))。参数：gDC (dB)、fz (GHz)、fp1 (GHz)、fp2 (GHz)。
- **3-Pole 扩展模式**（OIF CEI-56G/112G, 802.3dj）：在 2-Pole 基础上增加低频增益 gDC2 和低频极点/零点 fLF。参数额外包含：gDC2 (dB)、fLF (GHz)。
- **3-Pole-2-Zero 模式**（IEEE 802.3ck/178A）：采用 3 极点 2 零点拓扑，传递函数为 H(f) = G · (1+jf/fz1)(1+jf/fz2) / ((1+jf/fp1)(1+jf/fp2)(1+jf/fp3))。参数：G1 (dB)、G2 (dB)、fz1 (GHz)、fz2 (GHz)、fp1 (GHz)、fp2 (GHz)、fp3 (GHz)。
- **预设配置**：内置 OIF-CEI（28G-VSR / 56G-PAM4 / 112G-PAM4）、IEEE 802.3（802.3dj-200G / 802.3ck 等）、PCIe（Gen1~7）、USB3.2（Gen1/Gen2）、USB4（Gen2/Gen3）等参考 CTLE 预设，采用"协议族 → 具体配置"两级菜单。选择预设自动填充极点/零点频率，并设定 gDC（及 3-Pole 的 gDC2）增益的默认值与优化上下限。选择 802.3 系列预设（bs/cd CR/KR 与 C2C、ck CR/KR 与 C2C、dj 200G）时，同时按该标准的参考接收机 / 发射机把 DFE 各抽头、TX FFE 各系数（及 dj 的 RX FFE）的上下限写入对应控件，例如 ck CR/KR 的 DFE 第 1 抽头 [0.3, 0.85]、第 2 抽头 [0.05, 0.3]，dj 的 DFE [0, 0.85]、TX c(−1) ∈ [−0.34, 0]；已有抽头值会被钳入新界。TX FFE 的上下限按标准的 Σ|c(k)| = 1 约定（L1 形，即界面显示的系数）定义，优化器在该约定下搜索；RX FFE 的上下限按 COM 的游标 = 1 约定（主抽头相对）定义。用户可在预设基础上调整 gDC 增益。

- **复位按钮**：点击"复位"将 gDC 和 gDC2 恢复为当前所选预设的默认值，极点/零点频率参数不受影响。
- **优化 CTLE 按钮**：点击"优化 CTLE"将对 gDC 和 gDC2（3-Pole 模式）执行二维网格搜索，自动找出使 COM 最大的最优增益组合。搜索仅在当前预设（或用户设定）的 gDC / gDC2 上下限范围内进行，保持其他参数（极点/零点频率、FFE 等）不变，完成后自动填入最优值。优化收尾会以实际部署链路做三方复核（优化增益 / 旁路 / 原增益），取真实 COM 最优者落地：若旁路更优（如极点预设与当前速率不匹配），CTLE 将自动关闭并在状态栏提示；若原增益更优，保留原增益不降质。远程控制下同一裁决通过 SCPI 事件码 +301 上报。旁路裁决还会在随后的 FFE 优化（TX FFE / RX FFE / 联合）完成时复核：以落选的 CTLE 优化增益重跑同一 FFE 优化，两条链路的最终真实 COM 取优——若"CTLE + 重优化 FFE"反超旁路链，CTLE 自动重新启用并采用该 FFE 结果，状态栏与 +301 事件给出两者数值；旁路仍更优则保持。单独的 DFE 优化同样复核：在 CTLE 链路上重新提取 DFE 抽头并比较两条链路的真实 COM，反超则重新启用 CTLE 并采用该 DFE 结果。

10.7 RX FFE 均衡器

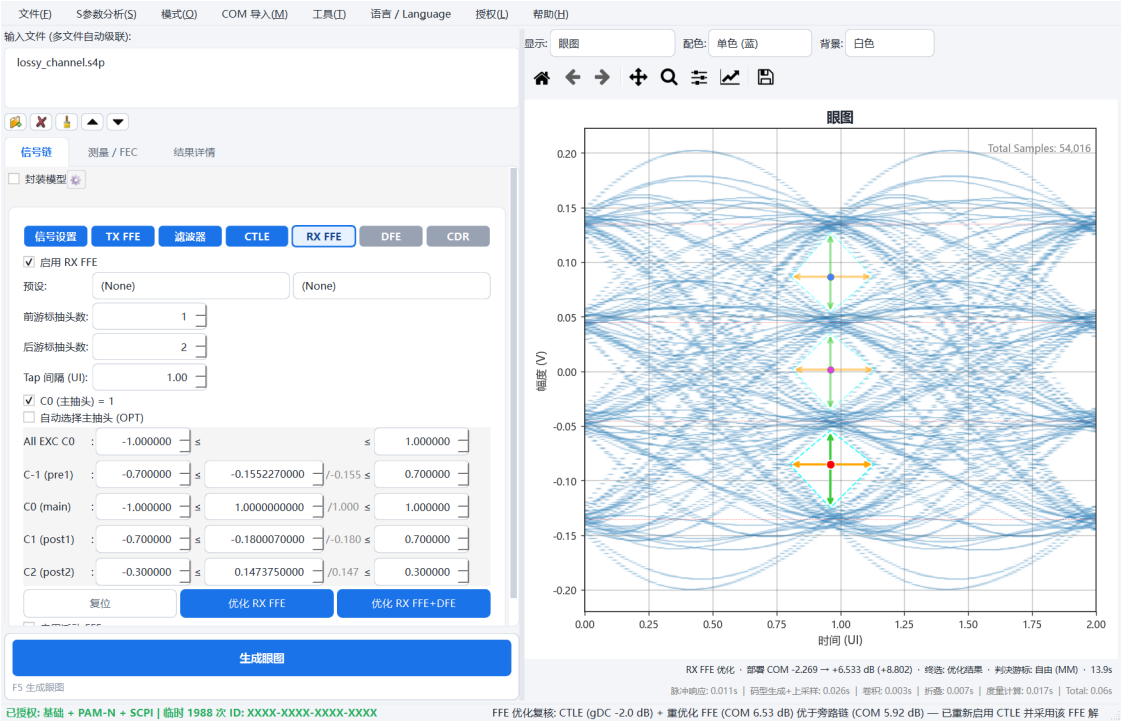

图 10-7 RX FFE 配置页 — 启用并优化后, 眼开口进一步增大

支持接收端前馈均衡器（RX FFE），作用于 CTLE 之后。信号处理链为：Channel → TX FFE → RX Filter → CTLE → RX FFE。

- **手动设置**：直接输入 pre-cursor 和 post-cursor 抽头数及系数

- **自动优化**：优化 RX FFE 时自动将 TX FFE 和 CTLE 作为固定量考虑，反之亦然。FFE 优化器感知 CTLE 的存在。优化在各抽头的上下限范围内进行（接收均衡器未设定时的默认界：主抽头 ±1.0、紧邻主抽头的两个抽头 ±0.7、其余 ±0.3，以主抽头为 1 计），预设 / 用户 / COM 导入设定的界均被严格遵守。
- **联合优化 FFE+DFE**：当 DFE 启用时，RX FFE 页面会出现"优化 FFE+DFE"按钮。点击后对 RX FFE 和 DFE 的系数组合进行联合搜索，使两者配合后的链路裕量（COM）最大。优化完成后 RX FFE 和 DFE 的 tap 系数同时更新。
- **浮动 FFE**：勾选"浮动 FFE"复选框可在远端反射位置追加稀疏 tap，专门补偿固定 tap 覆盖范围之外的远端反射 ISI。配置参数（组数 N_bg / 每组 tap 数 N_bf / 搜索范围 / 最大幅度 bmaxg）见浮动 FFE 设置面板，COM 导入会自动从 Excel 写入。

> **提示：主开关 OFF + 浮动 ON 也支持纯浮动模式**：若关闭"启用 RX FFE"主开关但勾选"浮动 FFE"复选框，则只用浮动 tap 参与眼图生成与优化（不再使用任何固定 tap）。该模式适用于固定 tap 已由其他途径配置、仅需补偿远端反射的场景。

10.8 DFE 决策反馈均衡器

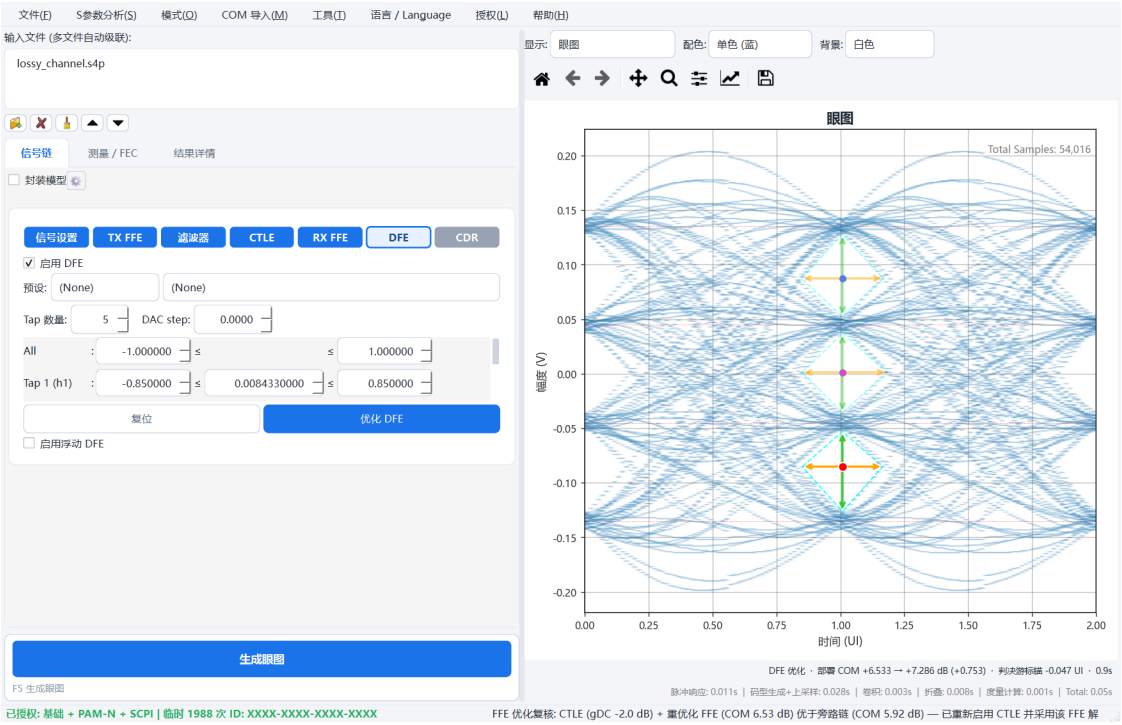

图 10-8 DFE 配置页 — 启用 5-tap 并优化后，残余反射拖尾被消除

DFE（Decision Feedback Equalizer）位于信号链的最后均衡位置，在 RX FFE 之后对采样信号进行逐符号判决反馈均衡。完整信号链为：Channel → TX FFE → RX Filter → CTLE → RX FFE → DFE。

DFE 与 FFE 本质不同：FFE 是线性前馈滤波器，可预卷积到脉冲响应；DFE 是非线性反馈回路，逐符号在采样点减去前序判决符号的 ISI 贡献，然后进行判决（切片到最近 PAM 电平）。

- **Tap 数量**：支持 1~32 阶 DFE tap，通过"Tap 数量"控制。每个 tap 对应一个后光标符号的 ISI 消除系数。
- **Tap 系数**：每个 tap 的范围为 -2.0 ~ 2.0。Tap 1 (h1) 消除第一个后光标 ISI，Tap 2 (h2) 消除第二个，以此类推。
- **与 FFE/CTLE 配合**：DFE 作为最后级均衡器，通常与 CTLE 和 FFE 联合使用以获得最佳眼图效果。FFE/CTLE 优化时，DFE 作为固定后级参与评估。
- **复位按钮**：点击"复位"将所有 tap 系数归零。
- **优化 DFE 按钮**：点击"优化 DFE"将基于零强制算法，从通道综合脉冲响应自动提取最优 DFE tap 系数。判决游标与抽头联合选择：在脉冲峰前后 ±½ UI 内逐相位提取零强制抽头，用与眼图指标相同的 COM 裁判逐相位打分取优（重均衡信道的最佳判决点常在脉冲峰之前），赢家相位同时作为后续眼图 / COM 的采样锚。优化过程考虑当前所有上游均衡器设置（TX FFE、RX Filter、CTLE、RX FFE），提取结果自动裁剪到各 tap 的上下限（预设 / COM 导入设定，如 PCIe 的 |d1/h0| 比例上限）范围内；未设定时的默认界为PAM4 第 1 抽头 ±0.85（802.3ck / dj 参考接收机 b_max(1) = 0.85；NRZ 为 ±1.0），其余抽头 ±1.0，联合优化的 b1 搜索范围同样受此默认界约束。
- **浮动 DFE**：勾选"浮动 DFE"复选框可在远端 UI 位置追加稀疏 DFE tap，消除超出固定 tap 数量范围的远端反射 ISI。组数、每组 tap 数、搜索范围与最大幅度 bmaxg 见浮动 DFE 设置面板，COM 导入会自动从 Excel 写入。

> **提示：主 DFE OFF + 浮动 DFE ON 也支持纯浮动模式**：若关闭"启用 DFE"主开关但勾选"浮动 DFE"复选框，则只用浮动 DFE tap 参与眼图生成与优化（不再使用任何固定 DFE tap）。

10.9 CDR 时钟数据恢复

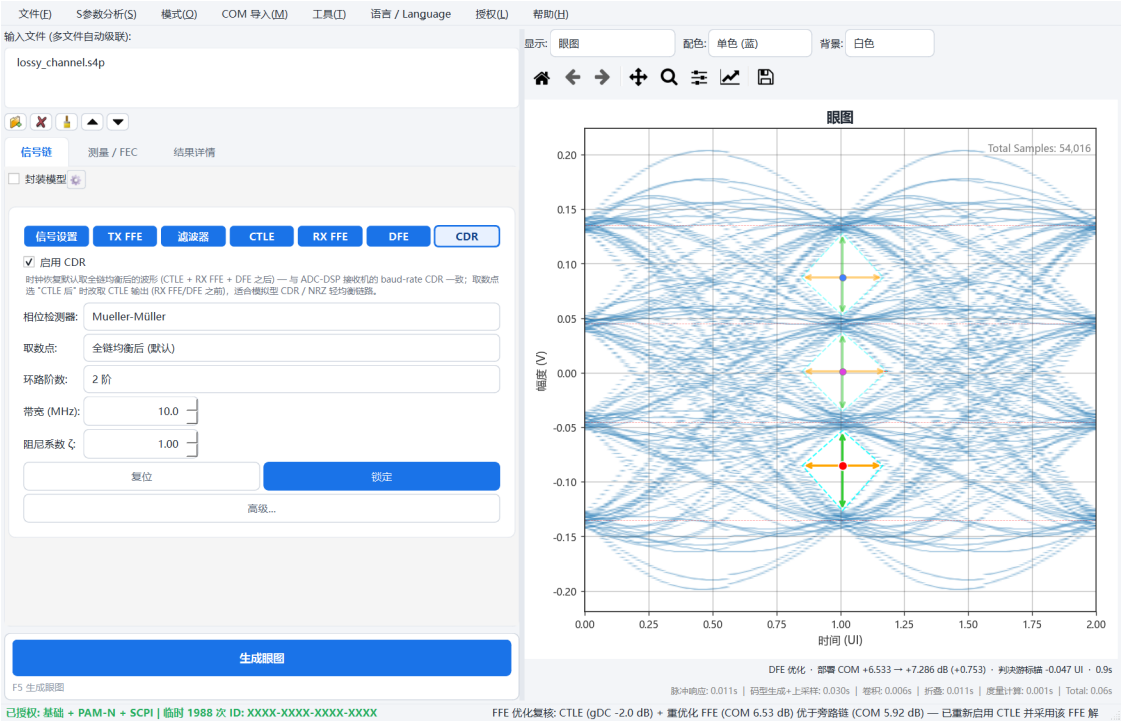

图 10-9 CDR 配置页 — 全链均衡后启用时钟恢复

取数点两档：默认"全链均衡后"(ADC-DSP baud-rate CDR 口径)；选"CTLE 后"则相位检测改取 CTLE 输出 (RX FFE/DFE 之前)，用于模拟型 CDR / NRZ 轻均衡链路。重均衡 PAM4 下 CTLE 后波形通常无定时信息，环路会安全退化关闭并提示 (advisory 305)。

CDR（Clock and Data Recovery）模拟接收机的时钟恢复电路，根据接收信号自适应调整采样时刻，而不是使用理想时钟采样。在左侧控制面板的"CDR"标签页中进行设置。

10.9.1 基本参数

点击 CDR 标签按钮打开参数页，勾选页内"启用 CDR"复选框启用功能。

参数	说明	默认值
相位检测器类型	Mueller-Müller（线性）或 Bang-Bang（二值型）	Mueller-Müller
环路阶数	一阶（仅比例控制）或二阶（比例+积分控制）	二阶
环路带宽 (MHz)	CDR 跟踪带宽，范围 0.1~1000.0 MHz	10.0
阻尼系数	二阶环路的阻尼系数，范围 0.1~5.0（仅二阶可见）	0.70

- **复位按钮**：将 CDR 基本参数恢复为默认值
- **锁定按钮**：启用 CDR 并自动选择合适的初始参数

10.9.2 CDR 锁定按钮

点击"锁定"按钮可一步启用 CDR 并立即生成眼图。这是一个便捷快捷方式，等价于勾选 CDR 启用后再点击"生成眼图"。

标定退化提示：CDR 环路对**最终均衡后的波形**（RX FFE / DFE 之后，即 ADC-DSP 接收机 baud-rate CDR 的采样位置）自动标定相位检测器（MM S 曲线）。若均衡后的眼仍接近闭合、没有可用的定时信息，环路会安全停用（等效 CDR 关闭，抖动不被跟踪），此时指标区会显示"⚠ CDR 已启用但标定退化未激活"警示行，远程控制下同一事实通过 SCPI 事件码 +305 上报（Normal 的生成眼图与 Expert 的管线运行均适用）。

10.9.3 高级设置

点击"高级设置"按钮打开 CDR 高级参数对话框，提供更精细的环路控制。

环路增益（Loop Gain）

- **Kp 手动覆写**：勾选后可手动设置比例增益 Kp，范围 0.0001~1.0，默认 0.001
- **Ki 手动覆写**：勾选后可手动设置积分增益 Ki，范围 0.0~0.1，默认 0.0001
- **PD 增益**：相位检测器增益，范围 0.01~10.0，默认 1.0

相位控制（Phase Control）

- **相位削波**（Phase Clip）：限制单步最大相位调整量，范围 0.1~10.0 UI，默认 2.0 UI

收敛控制（Convergence）

- **初始相位**：CDR 起始采样相位偏移，范围 -2.0~2.0 UI，默认 0.0
- **初始频率偏移**：CDR 起始频率偏移，范围 -0.1~0.1，默认 0.0
- **锁定延迟**：CDR 锁定前跳过的符号数，范围 0~10000，默认 0

10.9.4 CDR SSC

CDR 高级设置对话框中提供独立的 SSC（Spread Spectrum Clocking）设置，用于模拟 CDR 在 SSC 环境下的跟踪行为。

- **SSC 启用**：独立的 SSC 开关
- **SSC 频率**（kHz）：范围 1.0~100.0 kHz，默认 33.0 kHz
- **SSC PPM**：范围 0~10000 ppm，默认 5000 ppm
- **SSC 模式**：Down-spread 或 Center-spread

> **提示：**CDR SSC 与抖动 SSC 是独立的设置，可分别启用。CDR SSC 模拟时钟源的扩频，抖动 SSC 模拟数据流的扩频。

10.9.5 CDR SCPI 命令

命令	说明
CONF:CDR:ENAB ON|OFF	启用/禁用 CDR
CONF:CDR:TAPP POST|PRE	取数点（POST=全链均衡后·默认 / PRE=CTLE 后）
CONF:CDR:PDTY MM|BB	鉴相器类型（Mueller-Müller / Bang-Bang）
CONF:CDR:ORD 1|2	环路阶数（1 阶 / 2 阶）
CONF:CDR:BAND 10.0	环路带宽（MHz）
CONF:CDR:DAMP 0.70	阻尼系数
CONF:CDR:KP 0.001	手动 Kp 覆盖（0 = 自动）
CONF:CDR:KI 0.0001	手动 Ki 覆盖（0 = 自动）
CONF:CDR:PDG 1.0	PD 增益
CONF:CDR:CLIP 2.0	相位钳制（UI）
CONF:CDR:PHAS 0.0	初始相位（UI）
CONF:CDR:FREQ 0.0	初始频偏（UI/sym）
CONF:CDR:DEL 0	锁定延迟（符号）
CONF:SSC:ENAB ON|OFF	CDR SSC 启用/禁用
CONF:SSC:FREQ 33.0	SSC 频率（kHz）
CONF:SSC:PPM 5000	SSC 偏移（ppm）
CONF:SSC:MODE DOWN|CENTER	SSC 模式

10.10 抖动注入

抖动注入功能模拟时钟抖动对眼图的影响。在信号设置面板勾选"抖动"复选框启用，点击齿轮图标打开抖动设置对话框。

10.10.1 随机抖动（RJ）

随机抖动遵循高斯分布，通过 RMS 值（单位 UI）控制抖动幅度。

- RMS 范围：0.000~0.500 UI
- RMS 为 0 时随机抖动不生效

10.10.2 正弦抖动（SJ）

正弦抖动模拟确定性周期抖动，支持最多 6 组独立的频率+幅度设置。

- **频率**（MHz）：正弦抖动的调制频率
- **幅度**（UI）：正弦抖动的峰峰值
- 点击"+"添加新的 SJ 分量，点击"-"删除最后一个
- 频率或幅度为 0 时该分量不生效

10.10.3 抖动 SSC

扩频时钟（Spread Spectrum Clocking）通过周期性调制数据率来降低 EMI 峰值。启用 SSC 后，数据率将在设定范围内周期性变化。

- **SSC 频率**（kHz）：调制频率，范围 1.0~100.0 kHz，默认 33.0 kHz
- **SSC PPM**：频率偏移量，范围 0~10000 ppm，默认 5000 ppm
- **SSC 模式**：Down-spread（向下扩频，频率仅向低方向偏移）或 Center-spread（中心扩频，频率向两侧对称偏移）

> **注意：**关闭抖动对话框会自动取消抖动注入。如需保持抖动设置，请使用"确认"按钮关闭对话框。

10.10.4 抖动 SCPI 命令

命令	说明
CONF:JITT:RJ 0.010	设置 RJ 均方根（UI）
CONF:JITT:SJ 100.0:0.1,200.0:0.05	设置 SJ 分量对（频率_MHz:幅度_UI，冒号分隔频率与幅度，多对之间以逗号分隔）
CONF:JITT:SJ NONE	清空所有 SJ 分量
CONF:JITT:SSC:ENAB ON|OFF	抖动 SSC 启用/禁用
CONF:JITT:SSC:FREQ 33.0	抖动 SSC 频率（kHz）
CONF:JITT:SSC:PPM 5000	抖动 SSC 偏移（ppm）
CONF:JITT:SSC:MODE DOWN|CENTER	抖动 SSC 模式

10.11 噪声注入

噪声注入功能允许在信号链的多个位置添加噪声，模拟真实系统中的噪声源对眼图质量的影响。在信号设置面板勾选"噪声"复选框启用，点击齿轮图标打开噪声设置对话框。

10.11.1 白噪声注入

信号链中提供 6 个白噪声注入点（N_0~N_5），分别位于不同的信号处理阶段之前。每个注入点可独立设置噪声幅度（Vrms）。

注入点	位置	说明
N_0	TX FFE 前	发射机本底噪声
N_1	Channel 前	TX FFE 输出端噪声
N_2	RX Filter 前	通道输出端噪声（串扰、EMI 等）
N_3	CTLE 前	RX 前端噪声
N_4	RX FFE 前	CTLE 输出端噪声
N_5	DFE 前	RX FFE 输出端噪声

信号链流程：$+N_0$ → TX FFE → $+N_1$ → Channel → $+N_2$ → RX Filter → $+N_3$ → CTLE → $+N_4$ → RX FFE → $+N_5$ → DFE → Eye

10.11.2 DM 正弦噪声

差模（Differential Mode）正弦噪声在 6 个注入点分别提供独立的频率（MHz）和幅度（mV pp）设置。可用于模拟特定频率的串扰干扰。

- 频率范围：0.0~10000.0 MHz
- 幅度范围：0.0~1000.0 mVpp
- 频率或幅度为 0 时该注入点的正弦噪声不生效

10.11.3 CM 正弦噪声

共模（Common Mode）正弦噪声同样在 6 个注入点提供频率和幅度设置。共模噪声通过 CMRR（共模抑制比）转换为差模分量后注入信号链。

- **CMRR**：共模抑制比，范围 0.0~120.0 dB，默认 40.0 dB。当加载 4 端口差分 S 参数时，CMRR 可从混合模式参数自动计算
- 频率和幅度参数与 DM 正弦噪声相同

> **注意：**关闭噪声对话框会自动取消噪声注入。如需保持噪声设置，请使用"确认"按钮关闭对话框。

10.11.4 噪声 SCPI 命令

命令	说明
CONF:SIGN:NOIS0–NOIS5 <val>	设置注入点 N_0–N_5 的白噪声幅度（Vrms）

命令	说明
CONF:NOIS:DM:FREQ0–FREQ5 <MHz>	DM 正弦噪声频率（MHz）
CONF:NOIS:DM:AMP0–AMP5 <mVpp>	DM 正弦噪声幅度（mVpp）
CONF:NOIS:CM:FREQ0–FREQ5 <MHz>	CM 正弦噪声频率（MHz）
CONF:NOIS:CM:AMP0–AMP5 <mVpp>	CM 正弦噪声幅度（mVpp）
CONF:NOIS:CM:CMRR 40.0	CMRR（dB）

10.12 眼图显示设置

右侧眼图区域上方提供显示控制选项：

- **显示内容**：眼图 / Impulse Response（脉冲响应）/ Pulse Response（单位脉冲响应）/ 浴盆曲线 / 模板容限五种视图。脉冲/单位脉冲视图可按均衡级（通道后、CTLE 后、FFE 后等）叠加显示各级响应曲线，便于观察每级均衡的贡献。浴盆曲线与模板容限两种视图见 10.12.1；切到模板容限时组合框右侧出现"模板…"按钮设置模板形状与尺寸，其余视图下该按钮隐藏，眼图/响应视图的布局与操作不变。专家模式多眼视图的"视图"组合框有同样五项，逐探针绘制。
- **右键菜单**：眼图 / 多眼视图上右键 → "复制图像"（位图进系统剪贴板，可直接贴进文档或聊天）、"导出波形 CSV…"（判决点处的连续波形捕获，从折叠起点起默认 2048 UI，两列 time_s,v；流式长码型与光域探针不提供）。S 参数各图的右键菜单同样有"复制图像"。对应 SCPI：CONF:WAVE:SAVE "路径" / CONF:PIPE:WAVE:SAVE 探针,"路径"
- **颜色方案**：单色（Mono）、热力图（Heat）、Jet 三种色彩映射可选
- **背景色**：白色或黑色背景

颜色和背景设置仅影响眼图的可视化效果，不影响度量计算。

10.12.1 浴盆曲线与模板容限

两种视图都直接由当前折叠眼图的全部轨迹计算（不改变眼图算法与其它指标），与 S2eye 的 bathtub / eye-mask 功能同类。

- **浴盆曲线（BER vs 相位 / 判决电压）**：对每个眼，在其判决列把轨迹按判决电平分成上下两组，电压门限 v 扫过眼内得到 BER(v) = ½[P(下组 > v) + P(上组 < v)]；采样相位 t 扫过 2 UI

窗，按每条轨迹的门限交叉时刻（列间线性插值）计数得到 BER(t)。实测段之外（每组最内侧样本以外）用高斯尾部外推：σ 取最内侧 5% 样本（8~150 个）在 Q 尺度上的加权最小二乘斜率，外推曲线锚定在最内侧样本处与实测 1/n 连续，图中实线为实测、点线为外推。**EH@BER / EW@BER** = 组合曲线中 BER ≤ 目标 BER 且包含判决点的连续区间宽度；目标 BER 取 COM 噪声预算的 DER_0（specBER），未设置时为 1e-12，另报 1e-6 / 1e-9 / 1e-12 三档。轨迹数 n 决定实测下限 1/n 与外推起点：码型越长（PRBS13/15）实测段越深、外推越可信；未渲染噪声的纯 ISI 眼在可测段内仍呈高斯形态，其外推是保守（偏悲观）估计，这是轨迹法浴盆曲线的固有口径（示波器双狄拉克拟合同理）。

Expert 浴盆视图一次显示一个探针，通过图表上方探针下拉或下方结果表切换；同一探针的全部子眼同时显示。各子眼按眼号从上到下分行，左列为水平浴盆（采样相位 UI），右列为垂直浴盆（判决电压 V），不混用横轴。实测与外推段分别绘制，不以整条实线覆盖外推段；点划线标出目标 BER。用左键上下拖动任一有效眼的 BER 线，可连续联动所有眼，各行即时显示当前 BER 下的眼高或眼宽，总体仍取最差眼。松开后恢复自适应范围；使用工具栏平移/缩放时不会触发 BER 拖动。Normal、Expert 和探针详情同步，精确输入沿用 specBER / CONF:NOIS:BER，FETC:EYE:BATH? 与 FETC:PIPE:BATH? 读回同一目标。拖动只重新读取已有曲线开口，不重新计算波形；实测/外推口径保持不变。横轴围绕曲线过渡区间自动留出余量，各眼统一相位范围；BER 纵轴随目标 BER 调整，下方保留一个数量级。“自适应缩放”和 Home 可恢复该范围。若任一预期子眼样本不足，浴盆图保留有效子眼曲线，显示有效眼数及“数据不足”；总体 EH@BER / EW@BER 不可用，不以零值代替。SCPI 摘要返回 available=0,status=INSUFFICIENT_DATA；尚未生成眼图时，查询沿用空响应及 No data 错误。总体不完整时，有效子眼仍可查询曲线；眼号从 1 起，缺失或越界眼号返回空响应，不改查其它子眼。

- **模板容限（眼图 + 模板）**："模板..."按钮设置形状（矩形 / 菱形 / 六边形）、模板高 EH（mV）、模板宽 EW（UI；矩形的宽、六边形上下边的宽）与参考线宽 EW@vref（UI；菱形与六边形在判决电平处的宽）。模板以每个眼的判决点（相位、电平）为中心；落入模板多边形内的样本数 hits > 0 即 FAIL（含过渡沿轨迹）。裕量：上/下裕量 = 模板上/下边到眼内侧轮廓的最小电压距离，左/右裕量 = 模板左/右顶点到眼内侧最近交叉点的相位距离（六边形取 EH 边线与参考线两者的较小值），正值表示眼包住模板；另给出模板宽度内眼高与判决电平（矩形/六边形取 vref ± EH/2 两线）处的眼宽。模板参数写入设置并随会话恢复；专家模式多眼视图共用同一套模板参数。

SCPI	说明
CONF:MASK:TYPE none|rect|diamond|hex	模板形状（none = 关闭，默认）；:TYPE? 查询
CONF:MASK:EH <V> / :EW <UI> / :EWVref <UI>	模板高（V）/ 宽（UI）/ 参考线宽（UI），各有查询形式

SCPI	说明
FETC:EYE:BATH?	浴盆曲线摘要：available, target_ber, n_traces, eh_at_ber_v, ew_at_ber_ui, eh_1e-6/9/12_v, ew_1e-6/9/12_ui, eyeN_sigma_v_lo/hi, eyeN_sigma_t_l/r_ui, eyeN_floor
FETC:EYE:BATH:CURV? V|T[,眼号]	曲线数据 x:ber;x:ber;...（V：电压 V；T：相位 UI；眼号 1 起）
FETC:EYE:MASK?	模板容限：type, eh_v, ew_ui, ew_vref_ui, pass, hits, mask_eh_v, mask_ew_ui, worst_margin_v/ui, eyeN_pass/hits/margin_left/right_ui/margin_top/bottom_v
FETC:PIPE:BATH? / :BATH:CURV? / :MASK? <probe>	专家模式探针的同口径查询（探针 id 在前）
DEBU:GUI:EYE:MODE 0..4 / DEBU:GUI:MEYE:MODE 0..4	驱动 Normal 显示组合框 / 多眼视图组合框（0 眼图 1 Impulse 2 Pulse 3 浴盆 4 模板）

10.13 优化采样密度设置

通过菜单栏"文件" → "优化算法" → "优化采样密度"可选择16 点/UI（快速）、32 点/UI（默认）、64 点/UI（精确）三档。该设置影响 FFE/CTLE 等优化过程内部评估时的每 UI 采样点数。

> **提示：**64 点/UI 适合多 tap FFE 优化（≥8 taps），耗时约为 16 点/UI 的 4 倍。日常使用推荐默认 32 点/UI。设置会自动保存，重启后保留。

10.14 优化算法选择

通过菜单栏"文件" → "优化算法"可选择均衡优化使用的搜索算法与 COM 相关参数。优化目标固定为 COM（链路裕量指标，与结果面板 COM_93A 同源）。

菜单项	说明	默认
Nelder-Mead (快速)	快速收敛的自动搜索，速度快、结果稳	默认

菜单项	说明	默认
网格搜索	按步长系统性遍历 tap 组合（子菜单：步长 0.005~0.05 或自定义；局部搜索 = 最优点附近的细化搜索范围；候选数上限 = 每阶段最多评估的有效候选数，超出按离种子由近到远截取，用候选数而非时间封顶，不同性能的电脑得到相同结果）	步长 0.02，局部搜索 35，候选数上限 1M
COM Top-N Cursors	COM 快速评估的 PDF top-N 游标数，大 N 更精确略慢	32

提示：两种算法均自动利用本机硬件资源（GPU 显存 / CPU 多核）加速。日常使用推荐 Nelder-Mead；网格搜索适合需要穷举验证的场景。所有优化均以 COM 为目标函数；优化前的参数（以及 COM 导入时的基线参数）与优化结果一起进入终选，按实际部署结果选优，并明确报告优化前后数值、不优或失败原因（见 10.14.2）。更改抽头结构、阶段开关或搜索界后，应重新生成眼图核对结果；固定和浮动抽头分别优化，优化其中一段时保持另一段。

10.14.1 优化上下限

CTLE（gDC / gDC2）、TX FFE、RX FFE、DFE 的每个可调参数都带上下限约束。选择协议预设（PCIe / USB / 802.3 / OIF-CEI）或导入 COM 配置时，这些界会自动写入对应控件；也可在各均衡器面板手动修改。

四类均衡器的自动优化——无论由 GUI 按钮还是 SCPI 命令触发——均严格在上下限范围内搜索，绝不越界。例如 PCIe DFE 预设会将 tap-1 的|d1/h0| 比例上限（PCIe5/6/7 = 0.8 / 0.55 / 0.5）写入 DFE tap-1 的界，DFE 优化结果不会超过该值。

提示：CTLE 的 gDC / gDC2 优化界可通过 SCPI 命令 CONF:CTLE:GAIN:MIN|MAX 与 CONF:CTLE:GAIN2:MIN|MAX 单独设置；FFE / RX FFE / DFE 的每抽头界随预设或 COM 导入自动配置。

10.14.2 优化摘要与事件提示

每次优化（CTLE / TX FFE / TX FFE+DFE 联合 / RX FFE / RX FFE+DFE 联合 / DFE）完成并重新生成眼图后，眼图右侧、耗时行上方会出现一行**优化摘要**：优化种类 · 部署 COM 优化前 → 优化后（Δ）· 终选（优化结果 / 起点 / 基线对；联合优化另注起点数）· 判决游标（锚点偏移或自由 MM）· 耗时 · 事件条数（鼠标悬停可逐条查看）。摘要随语言切换刷新，*RST 后清空。

优化不会静默：若终选保留了起点或基线对、或优化结果与起点持平（抽头未改善），若 DFE 优化的零强制抽头被抽头界钳位（例如 802.3ck-C2C 预设按标准给 DFE 首抽头带 0.3 的下限，此时应改用 RX FFE+DFE 联合优化）、若优化后部署 COM 低于优化前、若优化器内部发生降级（如 GPU 批评估故障改走 CPU、旁路复核失败保持旁路解），都会记为一条**事件**，同时显示在状态栏（最近 3 条）、摘要事件计数（悬停查看），并推入 SCPI 错误队列（正码 +302，由 SYST:ERR? 逐条弹出，与 +301 裁决建议并列）。事件文案随界面语言（中/英）。优化失败时摘要以红字显示"⚠ <种类>失败: 原因"，SCPI 端报 -300。

> **提示：**旧版"文件 → 优化算法 → 允许 COM 劣化"菜单与 CONF:OPT:DEGRade 命令已移除：软件统一比较优化候选、起点与导入基线，并在摘要中报告实际部署值。进行中的优化可用面板上的停止按钮或 SCPI ABORt 中止（包括 SCPI 触发的 FFE / RX FFE / CTLE 优化），中止后参数保持不变。

10.15 GPU (CUDA) 加速

GPU / CUDA 加速对所有用户免费默认支持，无需选件授权。硬件支持 CUDA 时，可通过菜单栏"工具" → "启用 CUDA 加速"开启，"工具" → "CUDA 加速状态"可查看检测详情。GPU 加速可显著提高高阶 PRBS 的眼图计算速度。

> **提示：**GPU 和 CPU 计算路径产生一致的眼图度量结果。开关 GPU 加速不会影响计算结果，仅影响计算速度。

10.16 流式处理

高阶 PRBS（>15）自动切换为流式分块处理，以有限内存完成超长码型的眼图统计，结果与整段一次性计算一致。流式模式在后台异步执行，界面带进度条显示进度。

10.17 串扰注入

串扰注入功能允许添加 FEXT（远端串扰）和 NEXT（近端串扰）路径，模拟多通道环境下的串扰噪声对眼图的影响。

10.17.1 基本操作

- 在眼图标签页点击"Crosstalk"按钮打开串扰注入对话框
- 点击 Add FEXT / Add NEXT 添加串扰 S 参数文件
- S4P 文件支持独立的差分端口配对（TX+/TX-/RX+/RX-）
- 每条串扰路径可设置独立的幅度（Vpp）和延迟

10.17.2 ICN 计算

ICN（Integrated Crosstalk Noise）遵循 IEEE 802.3 COM 标准计算：

- 串扰信号经过受害通道 RX 均衡链（RX Filter → CTLE → RX FFE）
- ICN 包含 $sinc^2$ 采样保持功率加权
- FEXT ICN 额外包含 TX FFE 功率加权（与 COM 参考实现一致）
- NEXT ICN 不包含 TX FFE（按 COM 标准）
- ICN 按串扰幅度缩放：ICN_actual = A_x × ICN_normalized

10.17.3 COM 噪声预算影响

串扰启用时，ICN 通过 σ_XT 参与 COM 93A 噪声预算：σ_XT = ICN × $\sqrt{((L^2-1)/(3(L-1)^2))}$，其中 L 为 PAM 电平数。σ_total = RSS(σ_ISI, σ_J, σ_XT, σ_N, σ_TX)。眼图指标面板会显示 ICN 分量（FEXT/NEXT 分别列出），COM 分解行也会包含 XT 分量。

10.17.4 眼图三指标分层 (COM_93A / SNDR_93A / SNR_REA)

REA 提供三个语义独立的 dB 指标，对应不同的"信号 vs 噪声"维度。每个指标都对应一个明确的 20·log10(信号/噪声) 公式：

- **COM_93A** = 20·log10(As/A_ni)，**BER-conditional**。基于 IEEE 802.3 93A PDF integration + CDF 求 A_ni @ target BER。对应 SCPI 字段 COM_93A=。这是协议标准 COM 值，对齐 COM Tool / .m 计算。
- **SNDR_93A** = 20·log10(As/σ_total)，**BER-invariant**。基于 COM 93A 的噪声预算 σ_total = RSS(σ_ISI, σ_J, σ_TX, σ_N, σ_XT)，含 ISI 失真 + 全部 noise budget。对应 IEEE 802.3ck Annex 162B SNDR 定义。SCPI 字段 SNDR_93A_dB=。改 target_BER 此值不变（与 BER 解耦）。
- **SNR_REA** = 20·log10(As/σ_eye)，**BER-invariant**。σ_eye 为从实际渲染眼图的判决点统计中提取的等效噪声。SCPI 字段 SNR_REA_dB= + sigma_eye_mV=。这是"实际眼图"的 amplitude SNR，与协议预算 σ_total 互补：σ_eye 通常 < σ_total（眼图统计不含完整 budget，只反映 ISI 残余 + 已注入的 sim noise）。
- **VEO_REA**，**BER-conditional**，mV 单位。由眼图统计外推到目标 BER 处的垂直眼开口。SCPI 字段 VEO_mV= + VEO_PER_EYE=。

典型数值规律：SNR_REA > SNDR_93A > COM_93A（差距随场景变化 5~22 dB）。工程师可通过 per-σ SNR 子分量（SNR_X = 20·log10(As/σ_X)）一眼看出 noise 主导：若 SNR_ISI 接近 SNDR_93A，说明 ISI 是 bottleneck；若 SNR_N 最低，说明 RX 热噪声主导（典型高损通道）。

注：旧字段 COM_REA 已移除（语义与 COM_93A 重叠）。用户脚本应迁移到 SNR_REA_dB= 或 COM_93A=。

10.17.5 信道质量指标行（面板"信道 @Nyq"起的几行）

眼图生成后，指标面板在 ICN 之后追加信道本身的成绩单（Normal 与 Expert 探针同一渲染，SCPI FETC:EYE:CHAN? / FETC:PIPE:CHAN? 同源）。所有 dB 量按 IEEE 802.3

的**正损耗**约定（越大越好，与 S 参数图上 20log10|S| 符号相反）。取用的是眼图计算前的无源信道（含封装级联，不含端接/RX 滤波），Nyquist = 符号率/2；串扰攻击者与受害者同封装口径。

指标	含义 / 出处
IL @Nyq	-20log10|Sdd21| 于 Nyquist；Nyquist 超出文件带宽时取端点并标注
拟合 / ILD max / FOM_ILD	IEEE 802.3-2022 93A.3 拟合插损 a0+a1√f+a2f+a4f^2（权 10^(-IL/20)，频段 50 MHz~fb）；93A.4 ILD = IL - IL_fitted 的带内最大绝对值；FOM_ILD = √(1/N Σ W×ILD^2)，W = sinc^2(f/fb)/(1+(f/ft)^4)/(1+(f/fr)^8)，ft = 0.2365/Tt（TX 高斯 Tr），fr = RX 滤波带宽
RL @Nyq TX/RX，带内最差	-20log10|Sdd11| / |Sdd22|；带内最差 = 两端口回损的最小值
传播延迟	Sdd21 解卷相位对 ω 的最小二乘斜率（50 MHz~Nyquist）
串扰 PSXT / FEXT / NEXT / ICR	功率和串扰损耗 -10log10 Σ|S_xt|^2（按已加载的 FEXT/NEXT 攻击者），ICR = PSXT - IL（插损/串扰比，802.3 92.11 / 93.9 同式）
SDC21 / SCD21	4 端口混合模式的模式转换损耗（差→共 / 共→差）
对内偏斜	两条单端直通路径（p1+→p2+、p1-→p2-）的相位延迟之差
h-1 / h0 / h+1，ISI/h0	满摆幅单 UI 脉冲经均衡（DFE 前一级）后的游标电压与归一化 ISI Σ|h_k≠0|/|h0|；"DFE 后"为减去 DFE 抽头后的残余

提示：与 S2eye 的 runstats 列（ILS/ILS_fit/ILD/RL/XTK/ICR/DLY/SCD21/SDC21/hm1/h0/hp1/norm_isi）一一对应，只是 REA 按正损耗记数。COM 导入场景下这些值与 COM 工具的信道 FOM 可互相核对。

10.18 COM 导入

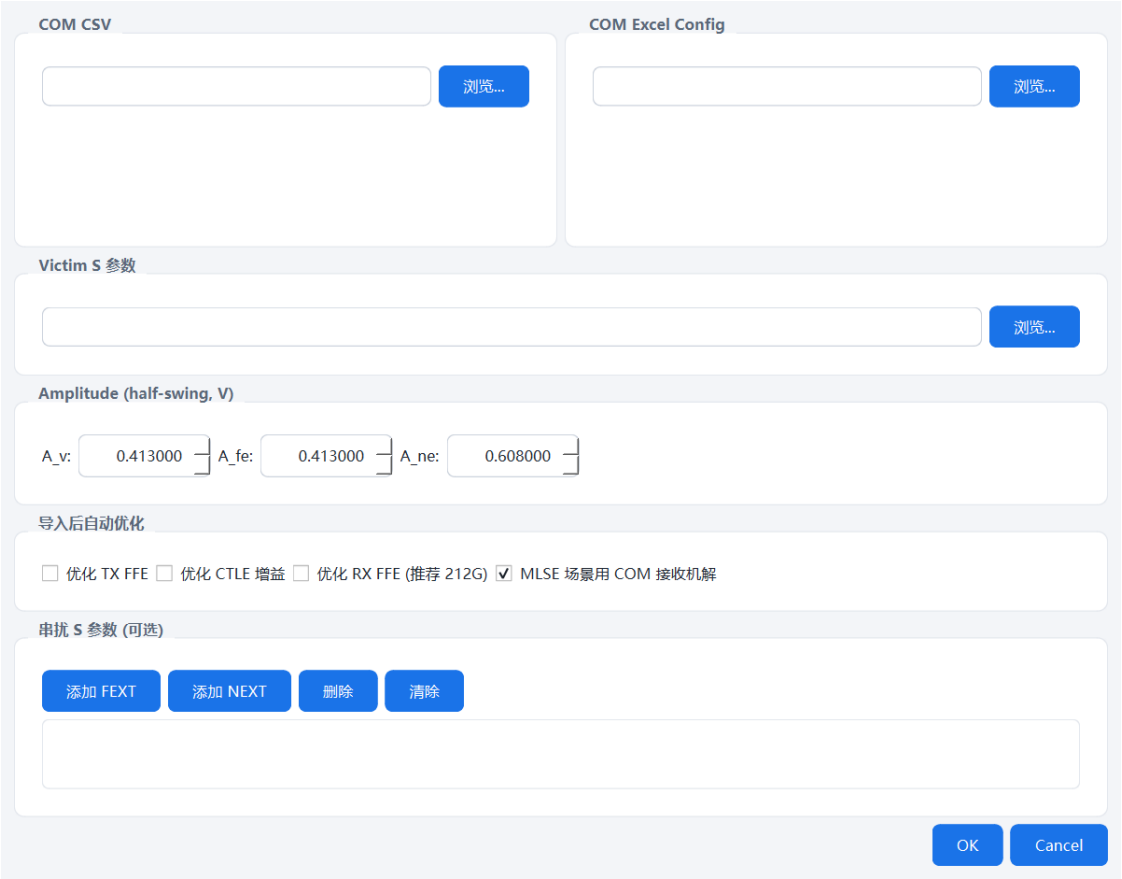

图 10-10 COM 导入配置对话框

COM 导入功能可从 IEEE 802.3 COM 工具的结果 CSV 和配置 Excel 中一键导入所有参数，包括信号设置、CTLE/FFE/DFE 配置、封装模型（TX/RX Package）、PCB 走线、TX 高斯滤波器、RX 滤波器、噪声预算参数、端口配对等。

- CSV 文件：包含 COM 优化结果（CTLE 增益、FFE/DFE taps、频率等）
- Excel 文件：包含 A_v、RX Filter、TX Gaussian、Package Model 等配置
- CTLE 模式自动检测：根据 fz2/fp3 参数选择 2-Pole / 3-Pole / 3P2Z
- 采样相位：PEAK（COM 标准）或 PULSE（优化模式）

操作步骤：

1. 点击菜单栏"COM 导入"打开配置对话框（图 10-10）。
2. "COM CSV"栏选择结果 CSV，下方即时预览通道/速率/COM 值。
3. "COM Excel Config"栏选择配置 Excel（波特率、封装、噪声预算等）。
4. "Victim S 参数"栏选择被测通道 .s4p。
5. （可选）勾选"导入后自动优化"，点击 OK — 参数一键写入并自动生成基线眼图。

> **提示：**随附演示模板：demo/com_import/ 提供 50G / 120G / 212G 三套完整的 CSV + Excel + 通道文件，可直接按上述步骤体验一键导入（见 3.4 节）。

10.18.1 封装模型

封装模型在 4 端口域级联后再提取差分 Sdd。支持 TX/RX 独立封装参数（gamma, tau, Z_c），PCB 板级走线（C_0/C_1 电容、Z_c 阻抗），以及 bump/via/die pad 等寄生参数。

第11章 Expert 模式（管线设计器）

标准（Normal）模式使用固定的信号链：信号源 → 通道 → 均衡器 → 眼图。Expert 模式将这条链"拆开"成可自由搭建的节点画布——您可以像在真实实验台上一样，任意排列信号处理模块、搭建多条并行链路，并用多个探针同时对比不同均衡方案的眼图。

11.1 进入与退出

菜单栏"模式" → "专家 (Expert)"进入；"标准 (Normal)"返回。Normal 与 Expert 两种模式完全独立、互不影响：切换只是在两个工作区之间来回，Expert 画布在退出时自动保存、再次进入时原样恢复；Expert 中的任何编辑都不会改动 Normal 的配置。"文件 → 保存/加载配置"（Ctrl+S / Ctrl+O）的配置文件同时携带两份状态：Normal 面板参数、Expert 画布（节点/连线/参数/位置）与保存时所处的模式——加载后模式与画布一并恢复。

- **复制 Normal 配置到 Expert**（"模式"菜单按钮，仅 Normal 模式下可见）：单次把当前 Normal 配置（通道文件、封装、已启用的均衡器、噪声设置）按物理信号链顺序构建为等效管线并覆盖 Expert 画布——复制后进入 Expert 即可看到与 Normal 等价的眼图，无需重新配置。这是两个模式之间唯一的桥梁。

> **注意：**Expert 画布不会跟随 Normal 的后续修改自动更新——在 Normal 中调整配置后如需同步到 Expert，请再次点击"复制 Normal 配置到 Expert"（会覆盖当前 Expert 画布）。

11.2 画布操作

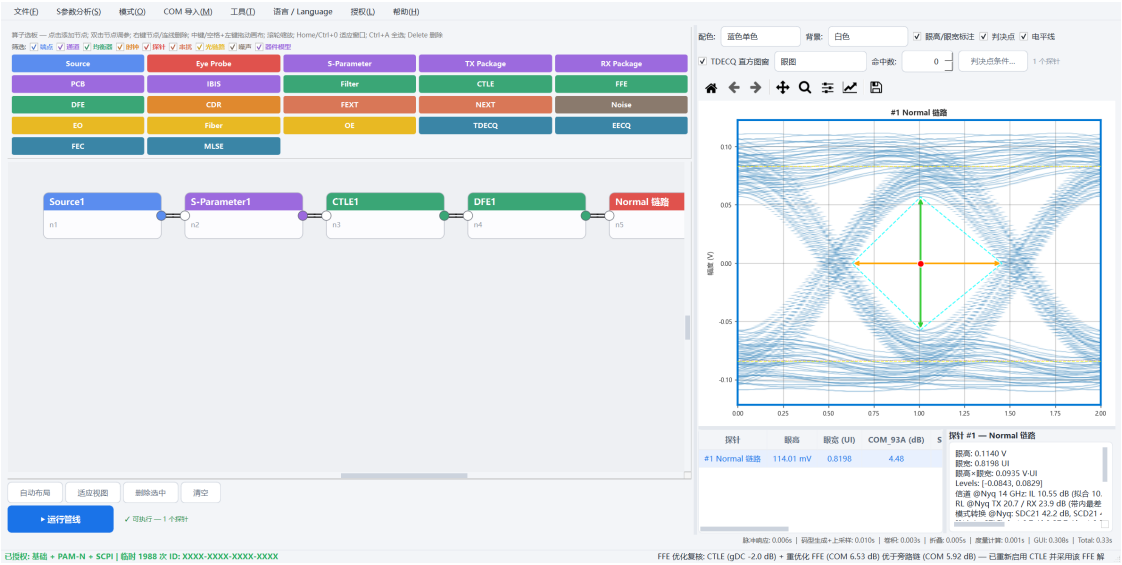

图 11-1 Expert 模式 — 节点画布与多探针眼图

操作	手势
添加节点	点击画布上方"算子选盘"中的类型按钮
连线	从上游节点的输出圆点拖拽到下游节点的输入圆点
编辑节点参数	双击节点，弹出配置对话框
节点/连线菜单	右键节点或连线（删除、优化等）
移动画布	中键拖动，或按住空格 + 左键拖动
缩放	鼠标滚轮；Home 或 Ctrl+0 适应视图（恒 1:1 摆进视口，不放大节点——窗口变大只是露出更多画布）
选择与删除	Ctrl+A 全选；Delete 删除选中
整理布局	"自动布局"按钮（拓扑排序，从左到右）

11.3 节点类型

节点	作用	每链数量
Source	信号源（类型/速率/码型/幅度/抖动/TX 高斯）	全局 1 个
S-Parameter	通道 / 线缆 / 夹具 S 参数段	可多段级联
TX/RX Package、PCB	发送端/接收端封装与板级走线模型	各至多 1
FFE	前馈均衡器，side 参数选 TX 端或 RX 端	TX/RX 各 1
Filter	接收端带宽限制滤波器（Bessel/Butterworth 等）	至多 1
CTLE	连续时间线性均衡器（2P/3P/3P2Z/PCIe 各代）	至多 1
DFE	判决反馈均衡器	至多 1
CDR	时钟数据恢复	至多 1
IBIS	IBIS / IBIS-AMI 器件模型（IBIS 8.0：.ibs 线性化或 Ts4file 模拟前端 + AMI 可执行模型，见 11.6）	TX/RX 交替，可含中继对
FEXT / NEXT	远端 / 近端串扰注入器（旁路注入）	可多个
Noise	白噪声 / 正弦噪声注入（接在任意位置）	可多个

节点	作用	每链数量
EO / Fiber / OE	光链路模块（见第12章）	光链各 1
TDECQ	802.3 参考接收机指标（见第12章）	终端节点
Eye Probe	探针——每个探针输出一张眼图	每链末端 1 个

拓扑规则：整个管线只有一个 Source；信号可以分叉成多条并行链路（例如同一通道后比较"仅 CTLE"与"CTLE+DFE"两种方案）；每条链以一个探针（或 TDECQ）结尾。

11.4 运行与结果

多眼图区顶部保留视图切换、"图表设置…"和探针数量。图表设置子窗口的"显示样式"页集中提供配色、背景、眼高/眼宽标注、判决点、电平线和 TDECQ 直方图窗开关；"判决设置"页提供命中数、搜索条件、强制电平和手动判决点。显示设置即时更新图形，判决条件沿用原有应用操作；关闭或按 Esc 后重开保留当前值。Normal 参数编辑与 SCPI 查询同步，包括浮动 FFE/DFE、眼比例、强制电平和 RX 上升时间；CDR 的 KP/KI 数值设置会同步启用覆盖，OFF 会取消勾选。频偏查询保留四位小数。封装、测量搜索条件、DFE 步进和主抽头自动选取的编辑也同步读回；应用按钮用于重新计算已有结果，单项编辑保留其它导入参数的精度。

点击"▶ 运行管线"执行整个管线。每个探针产生一张眼图，右侧多眼图区并排显示；下方表格列出每个探针的眼高 / 眼宽 / COM_93A / SNDR_93A / VEO / SNR_REA，点击行可查看该探针的详细指标。

长链路（光链、长码型）运行期间画布下方会出现**进度条**：百分比、已用时长与预估剩余时长实时更新，状态栏同步显示当前正在执行的节点。进度条旁的"⏸ 暂停"与"× 取消"按钮可随时冻结或停止本次运行——取消不消耗试用计次，眼图保持上一次运行的结果。SCPI 程控的 CONF:PIPE:RUN 同样点亮该进度显示。

> **注意：**修改任何节点参数或连线后，已显示的眼图会标记为"需重新运行"（黄色横幅提示）。再次点击"运行管线"即可刷新。

11.5 节点级优化

图 11-2 节点配置对话框（CTLE 示例, 含优化按钮）

双击 FFE / CTLE / DFE 节点打开配置对话框。FFE 提供"NM 优化"与"Grid 优化"；CTLE / DFE 提供"优化本模块"按钮（也可右键节点 → "优化此模块"）。优化以该节点下游探针的完整链路为评估环境，目标函数为 COM，与 Normal 模式的优化结果一致。优化完成后新参数自动写回节点。CTLE 优化同样带三方复核（优化增益 / 旁路 / 原增益）：原增益更优时自动还原以保证优化不降质；旁路更优时保留画布拓扑不变，仅在状态栏提示建议移除该 CTLE 节点或检查极点预设。三方复核使用与探针显示相同的噪声预算取真实 COM；该链上的 FFE 优化完成后还会再比较一次"保留 CTLE"与"移除 CTLE"两种链路的真实 COM，若移除仍更优，以 +301 事件再次提示；该链上的 DFE 优化完成后同样比较一次（移除 CTLE 的一侧重新提取 DFE 抽头）。

> **提示：**含 EO/Fiber/OE 的光链路同样支持均衡优化，目标函数自动切换为光域指标（TDECQ / 光眼开口）。

11.6 IBIS / IBIS-AMI 器件模型

IBIS 节点把硅片厂商提供的 IBIS 模型（最高 IBIS 8.0，2025-12 批准）接入 Expert 管线：从 .ibs 文件读取 [Model] 的 I-V 表、[Ramp]/波形表、C_comp 与封装描述，线性化为发射端（开路摆幅、输出阻抗、20-80% 边沿）和接收端（输入阻抗）的模拟前端；.ami 声明 Ts4file 时改用该 4 端口 Touchstone（Tx_Port_Order/Rx_Port_Order 13-24 或 12-34）作模拟缓冲，Tx_V/Tx_R/Rx_R 进入端接，Usage Dep 的值由 AMI_Resolve 解析；再按 IBIS 8.0 第 10 章参考流调用 [Algorithmic Model] 指向的 AMI 可执行文件（Windows 64 位 .dll + .ami 参数文件）。封装按 IBIS §7.2 优先级取用（节点"封装来源"）：[Interconnect Model Group] 的 Touchstone 模型或 IBIS-ISS 子电路（File_TS / File_IBIS-ISS，含 .ims 外部文件，差分对提取 Sdd；组件声明多个组时用"互连模型组"选择）> [Package Model]/[Define Package Model]（[Number Of Sections] stub 段按分布参数逐段级联、Fork 支路作并联负载；[Model Data] RLC 矩阵取差分对的奇模 L−M、C+2Cm）> [Pin] > [Package]。模型带 [C Comp Model]（IBIS 7.0+ §6.1）时，裸片电容改用其 Touchstone / IBIS-ISS 网络（TX 取 Driving、RX 取 Non-Driving；含 Buffer_I 探测端子时接收端输入取在该端子），节点"C_comp 来源"可退回集总 C_comp。IBIS-ISS（IBIS 互连 SPICE 子电路 1.0）由内置线性求解器求解：R/L/C/K/V、T 理想线、W 耦合有损线（RLGC 与频率表模型）、S 元件 Touchstone、E/F/G/H 受控源、子电路嵌套与 .param 表达式。

来源（优先级由高到低）	数据	REA 处理
[Interconnect Model Group]	File_TS Touchstone 或 File_IBIS-ISS 子电路（本文件或 .ims）	差分对提取 Sdd，其余端口按 Unused_port_termination；IBIS-ISS 由内置求解器求解；多组时用"互连模型组"选择
[Package Model] / [Define Package Model]	[Model Data] R/L/C 矩阵（Full / Banded / Sparse）或 [Number Of Sections] stub 段	矩阵取差分对奇模 L−M、C+2Cm；stub 段按分布参数逐段级联，Fork 支路作并联负载
[Pin] / [Package]	R_pin/L_pin/C_pin 或 R_pkg/L_pkg/C_pkg	集总 R–L 串联 + C 并联
[C Comp Model]（裸片电容）	File_TS typ/min/max 或 File_IBIS-ISS 逐角 + Param	TX 取 Driving、RX 取 Non-Driving / All；Buffer_I 端子为接收输入；Ts4file 前端时不套用；"C_comp 来源"可退回集总 C_comp

放置规则：side=TX 的 IBIS 节点放在 Source（可带 TX FFE）之后、通道节点之前；side=RX 的放在通道节点之后、探针之前；RX 节点紧接 TX 节点即构成中继对（IBIS §10.8 Retimer/Redriver，可级联），链末端必须是 Eye Probe。双击节点选择 .ibs 文件后，[Model] 与引脚下拉自动按方向过滤，.ami/.dll 自动从 [Algorithmic Model] 补全，对话框直接显示线性化结果与保留参数摘要；"AMI 参数..."表格可修改 Usage In/InOut 参数（Range 行限幅，List 行下拉，Corner 行由工艺角自动选值）。

图 11-3 IBIS 节点对话框（RX 示例）：文件/模型/引脚/封装来源、线性化摘要、AMI 可执行模型与 8.0 特性摘要

只有 Usage In / InOut 的参数可改; 与默认值相同的行不写入覆盖。Format Range 行按 [min ... max] 限幅, List/Corner 行下拉选择。

分支	参数	Usage	Type	Format / 范围	值	说明
Reserved	AMI_Version	Info	String	Value 8.0	8.0	Written again...
Reserved	Init_Returns_Impulse	Info	Boolean	Value True	True	AMI_Init ...
Reserved	GetWave_Exists	Info	Boolean	Value True	True	AMI_GetWave...
Reserved	Ignore_Bits	Info	Integer	Value 200	200	Maximum UI ...
Reserved	Max_Init_Aggressors	Info	Integer	Value 2	2	Up to two ...
Reserved	Model_Name	In	String	Value placeholder	placeholder	IBIS [Model] ...
Reserved	DLL_Path	In	String	Value placeholder	placeholder	Directory of t...
Reserved	DLL_ID	In	String	Value placeholder	placeholder	Unique ...
Reserved	Supporting_Files	Info	String	Table	rea_ref_rx_support.txt	Files the mod...
Reserved	Modulation_Levels	In	Integer	List 2 | 4	2	PAMn modulation ...
Reserved	PAM_Thresholds	Out	String	Value placeholder	placeholder	n-1 slicer ...
Reserved	PAM_Offsets	Out	String	Value placeholder	placeholder	n-1 per-eye ...

恢复默认　　确定　取消

图 11-4 "AMI 参数..."表格：Usage In/InOut 行可改，Info/Out 行灰显只读

仿真流	含义
自动	.ami 声明 GetWave_Exists 时走时域流，否则统计流
统计 (AMI_Init)	模型对信道脉冲响应做均衡，REA 用其结果折叠眼图（LTI）
时域 (AMI_GetWave)	逐块把 ±0.5 V 数字激励送入模型，输出判决点波形；RX 模型返回 clock_times 时眼图按该时钟采样（CDR 抖动自然包含）

其它约定：Ignore_Bits（-1 取 .ami 声明）在折叠前丢弃；"套用 .ami 抖动/噪声预算"把 Tx_Rj/Dj/Sj/DCD 施加到激励边沿、Rx_Clock_Recovery_* 施加到采样时钟（仅无模型时钟时）、Rx_Noise 加到判决点波形，Table 格式的 Tx_Jitter / Rx_Clock_PDF 概率表直接按表采样；TX 有 GetWave 而 RX 只有 Init 时按 6d 步骤取 RX 均衡滤波器——默认"自动"优先用方法 2（给 RX AMI_Init 多传一列单位冲激，其输出即滤波器，需 RX AMI_Version ≥ 7.2 且 Max_Init_Aggressors 有余量），否则方法 1 反卷积。§10.5 数据管理参数 DLL_Path / DLL_ID 由 REA 填入（可执行文件目录、唯一实例名），Supporting_Files 缺失即告警。眼图结果面板列出仿真流、时钟来源、线性化数值与模型返回的 AMI 输出参数/消息；SCPI 用 FETC:PIPE:IBIS? 查节点摘要，FETC:PIPE:EYE? 附带 ibis_flow / rx_clock_src / ami_rx_out 等字段。demo 目录的 ibis 子目录提供一套参考模型（rea_ref.ibs + AMI 发射/接收器及其 IBIS 8.0 变体）可直接试用。

TX GetWave + RX Init 组合（步骤 6d）	做法
自动（默认）	RX AMI_Version ≥ 7.2 且 Max_Init_Aggressors 有余量时用方法 2，否则方法 1
反卷积（方法 1）	用 RX AMI_Init 的输出与输入反卷积得 RX 均衡滤波器（正则化，信道高频衰减处可能低估均衡提升）
单位冲激列（方法 2）	给 RX AMI_Init 追加一列单位冲激 aggressor，其输出列即精确的 RX 增益/均衡滤波器（图 11-8）
忽略 TX GetWave	丢弃 TX GetWave 输出，按步骤 6c 用 Init 结果卷积

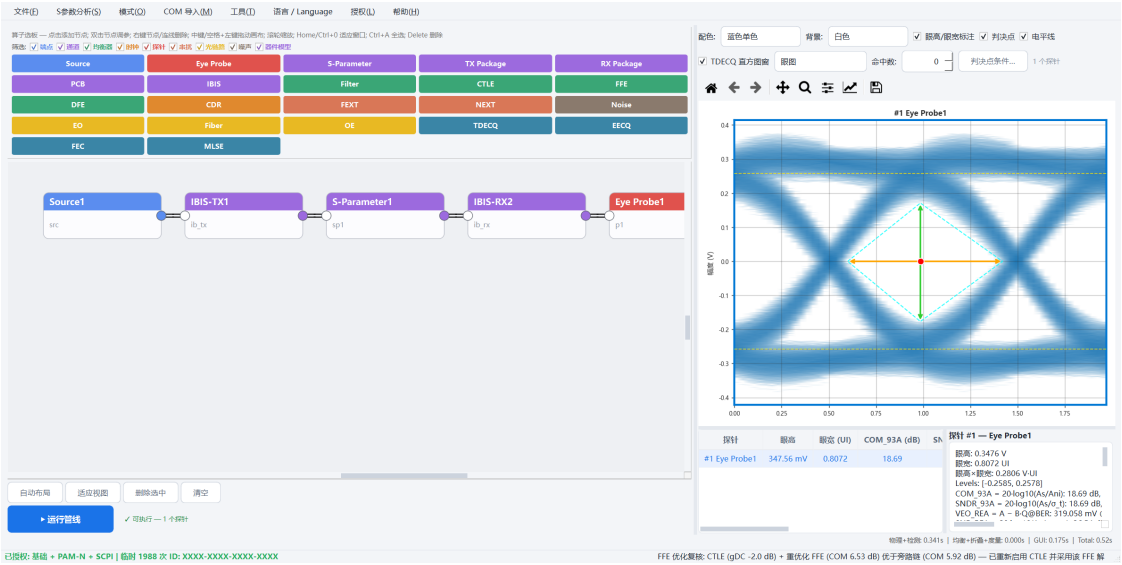

图 11-5 IBIS-AMI 链路：Source → IBIS(TX) → 通道 → IBIS(RX) → 探针，时域 GetWave 眼图与结果面板 IBIS 段

IBIS 8.0 / SerDes 扩展：挂在通道上的串扰注入器成为 AMI_Init 的 aggressor 列（每侧不超过 Max_Init_Aggressors，统计流串扰用接收模型均衡后的列合成）；接收模型输出 Adaptation_Valid 时，眼图从其首次为真的下一块起累计（Ignore_Bits 为上限）；Rx_Decision_Time 作统计流采样种子；PAMn 经 Modulation_Levels/PAM_Thresholds/PAM_Offsets。中继：Retimer 按中继接收模型的 clock_times 采样判决后再生数字激励驱动中继发射模型，Redriver 直接把接收模型的模拟波形送入下游，下游发射模型的 AMI_Init 输入按 Tx_Impulse_Input。BCI 链路训练（§10.9）：两端 .ami 声明相同 BCI_Protocol 时自动置 BCI_State=Training，Impulse 模式反复调用 AMI_Impulse 直到终端接收模型返回 Converged，GetWave 模式在块循环中监视 BCI_State（节点"BCI 链路训练"可关）。[AMI Test Configuration]（§10.11）由 SCPI FETC:PIPE:IBIS:TEST? 运行并与厂商 golden 数据比对。

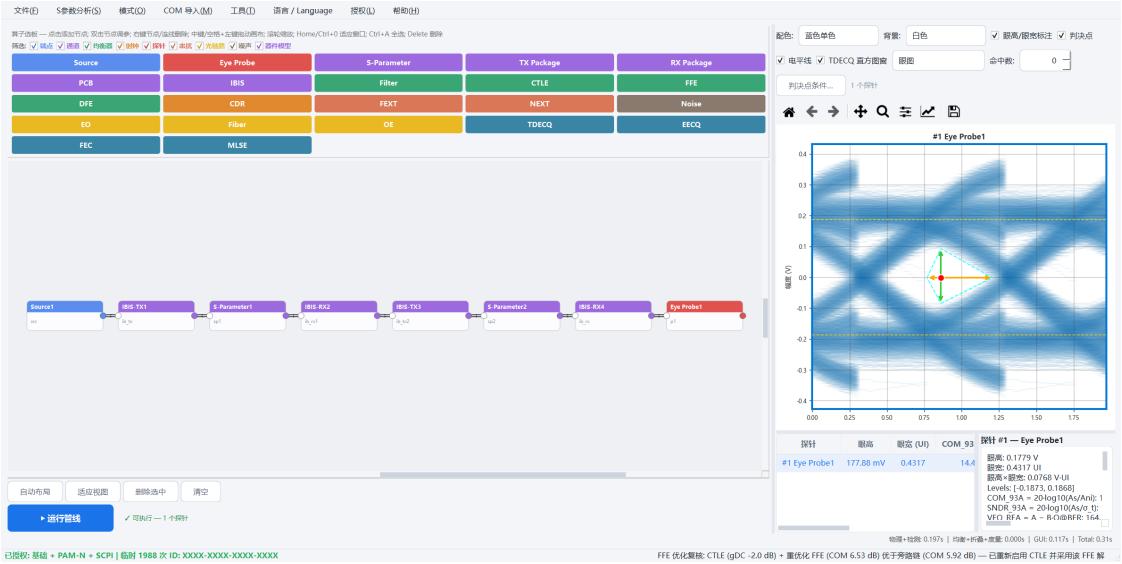

图 11-6 中继链：IBIS(RX) 紧接 IBIS(TX) 构成 Retimer 中继对，下游眼由再生激励驱动

```
IBIS / IBIS-AMI: 仿真流 time_domain/6a; 采样时钟: AMI clock_times (模型 CDR) (7751 clk)
  Ignore_Bits 200 UI; A_eq 1.000 V (ibis); T_r 12.6 ps (ibis:waveform); R_out 25.0 Ω / R_in 50.0 Ω
  PAM_Thresholds -0.126/0/0.126
  TX 模型 rea_ref_tx (Output)
    V_oc 1.000 V, R_out 25.0 Ω, C_comp 0.120 pF, T_r 12.6 ps (waveform)
    封装 [Interconnect Model] TX_PAIR_ISS (IBIS-ISS)
    C_comp [C Comp Model] rea_ref_ccomp.iss:rea_ccomp_tx (Driving, IBIS-ISS)
    AMI rea_ref_tx.ami + rea_ref_tx.dll (v7.2, Init_Returns_Impulse True, GetWave_Exists True, GetWave used, DLL_ID REA_38824_ib_tx_tx)
    AMI 输出参数: mode=auto
    AMI 消息: rea_ref_tx: FFE [0 0.9 -0.1] swing 1 spu 32 rows 13984 aggressors 0
  RX 模型 rea_ref_rx (Input)
    R_in 50.0 Ω, C_comp 0.100 pF
    封装 [Interconnect Model] RX_PAIR_ISS (IBIS-ISS)
    C_comp [C Comp Model] rea_ref_ccomp_rx.s2p (Non-Driving, Touchstone, Buffer_I)
    AMI rea_ref_rx.ami + rea_ref_rx.dll (v7.2, Init_Returns_Impulse True, GetWave_Exists True, GetWave used, DLL_ID REA_38824_ib_rx_rx)
    AMI 输出参数: Rx_Noise=0.002, Rx_Decision_Time=143.562, PAM4_UpperThreshold=0.126102
      PAM4_CenterThreshold=0, PAM4_LowerThreshold=-0.126102
      PAM_Thresholds=-0.126102 0 0.126102, PAM_Offsets=0 0 0, Adaptation_Valid=True
      support_file=none, gain_trim_db=0, instance_id=, dfe_tap1=0.358
    AMI 消息: rea_ref_rx: CTLE 3 dB, DFE 1 tap (adaptive), CDR bw 0.002 UI, NRZ, spu 32, aggressors 0, decision time 143.562 UI
  抖动/噪声预算: Rx_Noise σ 2.00 mV, uniform ±0.00 mV, sensitivity 10.0 mV
```

图 11-7 IBIS-ISS 子电路封装（互连模型组 REA_IC_GROUP_ISS）与 [C Comp Model] 裸片网络：结果面板 IBIS 段列出互连模型 (IBIS-ISS)、C_comp 网络、DLL_ID 与 AMI 输出参数

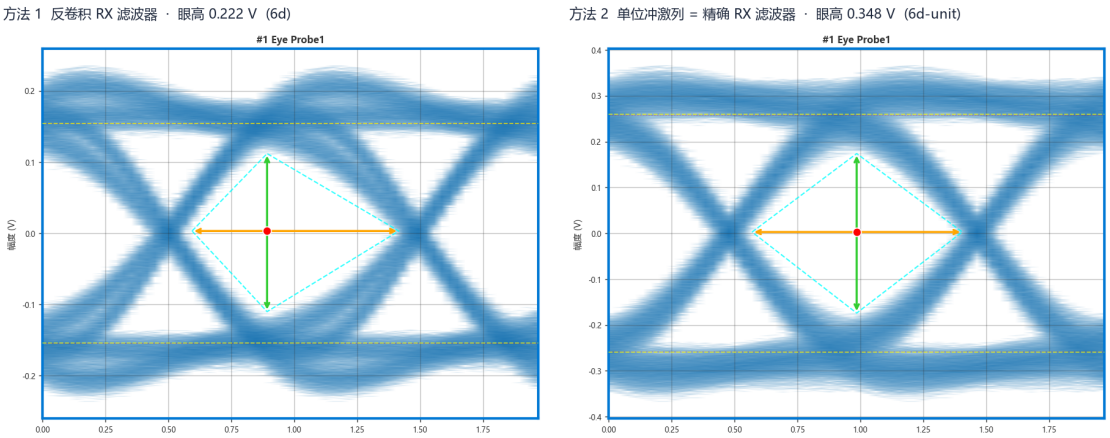

图 11-8 步骤 6d 的两种方法（TX GetWave + RX Init-only，同一链路）：左 = 方法 1 反卷积 RX 滤波器，右 = 方法 2 单位冲激列取精确 RX 滤波器（"自动"默认优先）

注意：AMI 模型是厂商提供的黑盒 DLL，在独立计算子进程中运行：模型崩溃只导致该探针报错，主程序不受影响。只支持 64 位 Windows 模型；面向高速以太网/PCIe SerDes，不做 DDR 类内容：非线性 I-V/V-T 瞬态驱动、[Submodel]/[Driver Schedule]、Rx_Use_Clock_Input 双输入时钟接收机；EBD/EMD 板级与模块级文件、[External Model] 多语言缓冲模型不读取。

第12章 光链路仿真与 TDECQ

在 Expert 画布上加入 EO（电→光调制器）、Fiber（光纤）、OE（光→电探测器）三类节点即可仿真完整的光互连链路：电驱动信号经调制器变为光功率波形，经光纤色散/衰减传输，再由光电探测器恢复为电信号。并可用 TDECQ 节点按 IEEE 802.3 规范评估光发射机质量。

12.1 搭建光链路

以最简单的"背对背 + 光纤"链路为例：

1. 进入 Expert 模式，清空画布（或在现有链路上分叉）。
2. 依次点击选盘中的 Source、EO、Fiber、OE、Eye Probe 添加五个节点。
3. 按信号方向连线：Source → EO → Fiber → OE → Probe。
4. 双击各节点设置参数（见 12.2），或先用默认值。
5. 点击"运行管线"，探针显示经过整条光链路后的电域眼图。

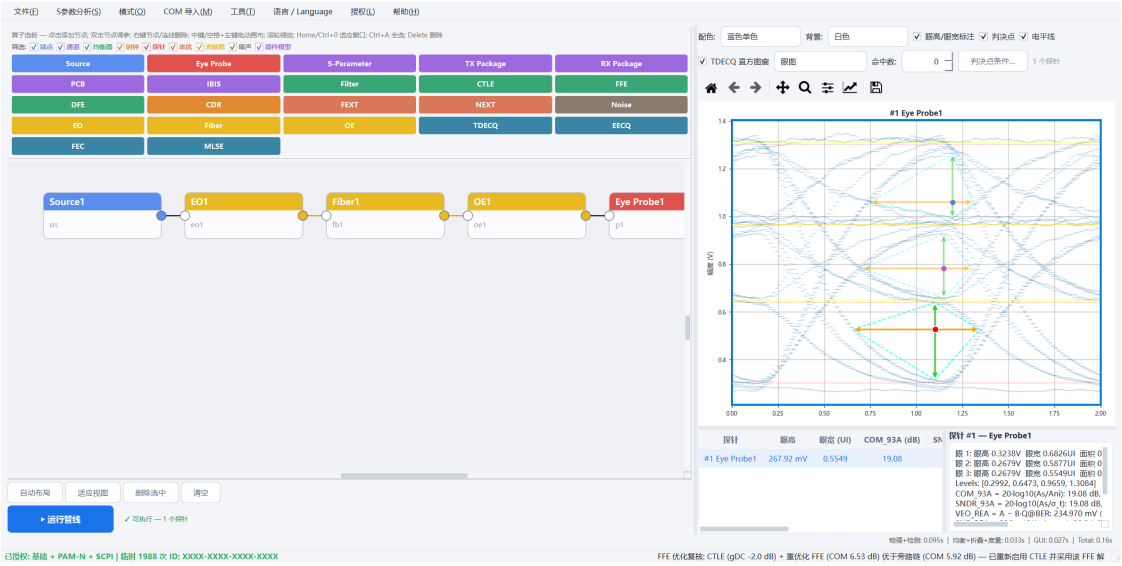

图 12-1 光链路：Source → EO → Fiber → OE → 探针

提示：探针的"信号域"参数默认"自动推断"：接在 OE 之后显示电眼图，接在 EO/Fiber 之后显示光功率眼图。也可手动指定电/光。

12.2 光模块参数

节点	关键参数
EO	调制器类型（MZM / EML / DML，切换自动套用该类型默认值）、波长 λ、消光比 ER、驱动摆幅、EO 带宽、激光功率、RIN
Fiber	光纤类型（SMF / MMF）、长度 (km)、衰减 α (dB/km)、色散 D (ps/nm/km) 与色散斜率、零色散波长、PMD 系数
OE	探测器类型（PIN / APD）、响应度 R (A/W)、PD/TIA 带宽、跨阻增益、暗电流、TIA 噪声、波特率预设（一键套用全套参数）

提示：EO 与 OE 均提供"波特率预设"，按常见速率（26/53/106 GBd 等）一键配置带宽等参数；EO/OE 也支持加载实测 S21 频响文件（Custom 模式）。已指定的频响文件若读取或处理失败，会报告错误并停止该次计算；不会替换为解析模型。未指定文件时使用所选解析模型。

注意：Fiber 的波长 λ 应与 EO 的波长一致（软件会自动同步提示）。色散随波长偏离零色散点增大，长距离 + 高速率时对眼图影响显著。

12.3 TDECQ 评估

TDECQ（Transmitter and Dispersion Eye Closure Quaternary）是 IEEE 802.3 为 PAM4 光发射机定义的核心指标：用规范的参考接收机（参考光电探测 + Bessel-Thomson 4 阶滤波 + 参考 FFE 均衡）测量光眼图闭合度，单位 dB，数值越小越好。

使用方法：在选盘中添加 TDECQ 节点，将其直接连接在 EO 或 Fiber 之后（TDECQ 输入固定为光信号），运行管线后节点显示 TDECQ (dB) 结果，多探针表格同步列出。

注意：TDECQ 节点必须接收"光信号"输入——请连接在 EO 或 Fiber 之后，不要接在 OE 之后（TDECQ 参考接收机内部自带光电转换）。

图 12-2 在光纤后并联 TDECQ 节点与电眼探针

12.3.1 TDECQ 主要设置

参数	说明
规范预设	802.3 各条款预设（Clause 121/178/184 及 802.3dj 草案），一键套用 FFE 抽头数 / DFE 许可 / 门限
码率	默认自动（从 Source 数据率推导）
参考均衡器	FFE 抽头数与间距按所选条款；部分条款允许 1-2 tap DFE
眼图输出	显示"滤波后（未均衡）"、"均衡后"或两者并列；均衡前眼单独按恒等均衡器测量（仅参考接收机滤波器，Ceq = 1，自己的直方图窗与采样相位，不出合规判定），均衡后 TDECQ 不应高于均衡前
详情框	多眼视图详情框首行为数值在前的摘要（TDECQ 值 · 限值判定 · Ceq · 规范），其后 DFE 抽头、FFE 抽头（4 个一行）、公式行与合规行，眼状态与电平排在最后，默认布局不拖动即可看全（EECQ 块同；其它探针顺序不变）；探针对比表在有 TDECQ / EECQ 探针时紧随探针列插入 "TDECQ (dB)" / "EECQ (dB)" 列
优化按钮	对上游 EO 驱动等参数自动寻优以最小化 TDECQ

提示：光链路上的均衡优化与 COM 数值不可兼得：光域评估采用 TDECQ / 光眼开口作为目标函数。探针指标表中光域链路的 COM 列显示为空属正常现象。

12.3.2 FFE 与 DFE 的联合求解（802.3dj 200G/lane 光口首发，已推广到全部带 DFE 的参考接收机）

802.3dj D3.1（Clause 180 / 182 / 183）的 TDECQ 参考均衡器是固定的 15 抽头 T 间隔 FFE 加 1 抽头判决反馈（DFE），反馈按正确判决建模，抽头受 Table 180-16 约束（b(1) 0 ~ 0.33、各抽头相对主抽头的比值上下限、|w(1)/w(0) − b(1) − w(−1)/w(0)| ≤ 0.25 等）。同一份后游标码间干扰，交给 FFE 消除要付出噪声放大（Ceq）的代价，交给 DFE 消除则没有；因此规范要求在给定采样相位和噪声量下对 FFE 与 DFE 系数联合求解，并允许任何能给出相同或更低 TDECQ 的替代方法。

所有 TDECQ / EECQ 测量块（含 DFE 的预设，以及只有 FFE 的预设）都在常规均衡优化之上追加一段规范主方法精修：以测试码型（源的已知符号序列，与规范模型中的 x(n) 一致；测量块拿不到码型时退回用当前均衡眼的判决）为参考序列，在给定噪声量下按规范准则一次性联合解出 15 个 FFE 抽头与 b(1)（Table 180-16 全部约束在求解中直接施加；只有 FFE 的预设则没有反馈项，前后游标耦合项退化为 |w(1)/w(0) − w(−1)/w(0)| ≤ 0.25），前游标个数 0 ~ 3 与反馈系数 b(1) 的 0 ~ 0.33 网格联合扫描取全局最优，再在最优前游标数上对 b(1) 做黄金分割精修；噪声量与抽头按规范"迭代过程"反复求解到不再改善。每一点都以真实 TDECQ / EECQ 作最终判据，仅在严格更优时才替换原结果。眼闭合时当前均衡眼的判决与码型已不相关，按判决拟合得到的是另一种（不依赖参考序列的）均衡解，此时它作为第二个候选与主方法的解交同一判据选优。DFE 的判决相位也随之联合选取：对每个候选相位施加反馈后在均衡后眼上量子眼开度，避免强反馈下从未均衡眼取相位造成的误判。SCPI 结果附 opt_winner（终选来源，联合精修胜出时为 dj-joint / joint，只有 FFE 时为 dj-mmse / mmse）与 joint（是否采用 / 评估次数 / 耗时 / 精修前指标）两个字段，便于对照。

同一思路也用到了光链路上 FFE 节点联合 DFE 的优化（专家模式 FFE 节点 + DFE 节点联合寻优）：在原有联合寻优得到结果之后，再对 DFE 首抽头做一次网格加黄金分割的精搜，每一点重解 FFE 并用该链路真实的眼图品质裁决，只在严格更优时替换。电链路的联合优化保持原有算法。

> **提示：**联合精修不改变原有的优化目标函数，只是把最终评价放到该链路的真实指标上并且只接受严格更优的结果，比较对象为同一配置下精修前的候选结果；不含 DFE 的预设也走同一段主方法精修。修改预设或抽头界后，应重新生成眼图并检查实际报告值。

第13章 SCPI 远程控制

Rapid Eye Analysis 支持通过 SCPI（Standard Commands for Programmable Instruments）协议进行远程控制，适用于自动化测试脚本和系统集成。

13.1 启动 SCPI 服务器

SCPI 服务集成在主程序内，随 Rapid Eye Analysis 启动自动运行，无需安装或启动任何额外组件。在菜单栏「工具 → 启用 SCPI 远程控制」可随时停用/重新启用；通过「工具 → SCPI 服务状态」查看当前服务地址和支持的命令数。

> **提示：**程序启动时 SCPI 服务器无条件运行（即使尚未激活 SCPI 选件）。未授权时仍可远程查询 Host ID 与状态、激活授权 Key、读取错误队列；但 INIT、MEAS、各类 OPT 优化、COM 导入等"执行型"命令会返回 错误：-200,"SCPI license not authorized; activate via LIC:ACT:SCPI"。激活永久 SCPI 选件 Key 后所有命令立即放行，无需重启。

客户端可通过 telnet 或 socket 连接，默认端口 5025。协议为 SCPI-raw over TCP/IP，行终止符为 LF（0x0A）。

13.2 命令总览

支持 IEEE 488.2 通用命令和以下 SCPI 子系统：

命令	说明
*IDN?	查询仪器标识
*RST	复位所有配置
*OPC?	等待当前操作完成并返回 1
*WAI	等待当前操作完成
*CLS	清除状态寄存器和错误队列
*OPT?	查询已授权选件串 (如 BASE,PAM,SCPI,FEC)
*TST?	自检 (仅内部依赖; 未加载文件不算失败)
ABORt	中止眼图计算与全部优化 (长优化阻塞期间亦可送达; 含 SCPI 触发的 FFE / RX FFE / CTLE 优化, 中止后参数不变)
CONF:FILE "path"	设置 S 参数文件路径 (.s2p/.s3p/.s4p)
CONF:FILE:ADD "path"	追加文件级联 (s2p/s3p/s4p 任意顺序混合)

命令	说明
CONF:FILE:LIST?	当前加载 / 级联的文件清单
CONF:S2P:DIR 0|1	S2P 段方向 (0=1→2, 1=2→1 镜像)
CONF:S3P:PAIR <序号>,<0-2>	第 n 个 S3P 文件差分对 (0=对1,2 / 1=对2,3 / 2=对1,3)
CONF:S3P:DIR <序号>,<0|1>	第 n 个 S3P 文件方向 (0=单端→差分, 1=差分→单端)
CONF:SIGN:PATT:FILE "path"	自定义码型文件 (0/1 文本; 置 PATT=CUSTOM)
CONF:SIGN:TYPE NRZ|PAM4|...	设置信号类型
CONF:SIGN:RATE 28.0	设置数据率 (Gbaud)
CONF:SIGN:VOLT 1.0	设置信号幅度 (Vpp)
CONF:SIGN:SPU 64	设置每 UI 采样点数
CONF:SIGN:PATT PRBS7|SSPR|SSPRQ	设置码型（SSPR 锁定 NRZ，SSPRQ 锁定 PAM4）
CONF:SIGN:SKIP 100|AUTO	设置跳过符号数
CONF:SIGN:RISE 0.2	设置 TX 上升时间 (UI)，范围 0.00~1.00
CONF:SIGN:FALL 0.2	设置 TX 下降时间 (UI)，范围 0.00~1.00
CONF:SIGN:GRAY ON|OFF	启用/禁用 Gray Code 编码（仅 PAM-4/PAM-8 有效）
CONF:SIGN:NOIS0 0.010	设置噪声注入点 N_0 幅度 (Vrms)，TX FFE 前
CONF:SIGN:NOIS1 0.010	设置噪声注入点 N_1 幅度 (Vrms)，Channel 前
CONF:SIGN:NOIS2 0.010	设置噪声注入点 N_2 幅度 (Vrms)，RX Filter 前
CONF:SIGN:NOIS3 0.010	设置噪声注入点 N_3 幅度 (Vrms)，CTLE 前
CONF:SIGN:NOIS4 0.010	设置噪声注入点 N_4 幅度 (Vrms)，RX FFE 前
CONF:SIGN:NOIS5 0.010	设置噪声注入点 N_5 幅度 (Vrms)，DFE 前
CONF:PORT:TX 0	设置发射端口索引
CONF:PORT:RX 1	设置接收端口索引
CONF:DIFF:ENAB ON|OFF	S4P 差分端口配对开关 (加载 S4P 自动开)
CONF:DIFF:PAIR 0|1|2|3	端口配对: 0=(0,1)(2,3) 1=(0,2)(1,3) 2=(0,3)(1,2) 3=自定义 (另见 PAIR AUTO)

命令	说明
CONF:DIFF:P1P/P1N/P2P/P2N <n>	自定义配对 (PAIR 3) 的四个端口号
CONF:FFE:ENAB ON|OFF	TX FFE 开关
CONF:FFE:PRE 1	Pre-cursor tap 数量
CONF:FFE:POST 2	Post-cursor tap 数量
CONF:FFE:SPAC 1.0	Tap 间隔 (UI)
CONF:FFE:TAPS 0.0,1.0,0.0,0.0	设置 FFE tap 系数
CONF:FFE:OPT	自动优化 FFE tap 系数
CONF:FFE:PRESET <name>	TX FFE 协议预设 (PCIe P0..Q9 / USB4-Pn / USB4v2-Pn)
CONF:FFE:UNIT_MAIN ON|OFF	FFE 主 tap 归一化为 1.0
CONF:FFE:BMIN/BMAX <list>|NONE	TX FFE 每抽头下 / 上限 (预设或 COM 导入自动写入; 优化严格在界内; 带 ? 回读)
CONF:FFE:MAIN_AUTO ON|OFF	main tap 自动: 优化后按 |tap| 最大位置重划 pre / post
CONF:FFE:OPTJ	联合优化 TX FFE + DFE（自动启用 DFE）
CONF:RXF:ENAB ON|OFF	RX 滤波器开关
CONF:RXF:TYPE GAUSSIAN|...	设置滤波器类型
CONF:RXF:BAND 20.0	设置滤波器 -3dB 带宽 (GHz)
CONF:RXF:RISE 25.0	设置 Gaussian 滤波器上升时间 (ps)，自动联动带宽
CONF:CTLE:ENAB ON|OFF	CTLE 均衡器开关
CONF:CTLE:MODE 2POLE|3POLE|3P2Z	CTLE 模式 (2-Pole / 3-Pole / 3-Pole-2-Zero)
CONF:CTLE:GAIN -6.0	CTLE DC 增益 gDC (dB)
CONF:CTLE:GAIN2 -1.0	CTLE 低频增益 gDC2 (dB, 3-Pole)
CONF:CTLE:ZERO 8.0	CTLE 零点频率 fz (GHz)
CONF:CTLE:POLE1 15.6	CTLE 极点1频率 fp1 (GHz)

命令	说明
CONF:CTLE:POLE2 14.1	CTLE 极点2频率 fp2 (GHz)
CONF:CTLE:FLF 1.2	CTLE 低频极点 fLF (GHz, 3-Pole)
CONF:CTLE:G1 -3.0	CTLE 178A 增益 G1 (dB, 3P2Z)
CONF:CTLE:G2 -1.5	CTLE 178A 增益 G2 (dB, 3P2Z)
CONF:CTLE:FZ1 10.0	CTLE 178A 零点1频率 fz1 (GHz, 3P2Z)
CONF:CTLE:FZ2 20.0	CTLE 178A 零点2频率 fz2 (GHz, 3P2Z)
CONF:CTLE:FP3 30.0	CTLE 178A 极点3频率 fp3 (GHz, 3P2Z)
CONF:CTLE:PRES Custom|OIF-28G-VSR|USB4-Gen3-CTLE|...	设置 CTLE 预设配置 (OIF/802.3/PCIe/USB)
CONF:CTLE:OPT	自动优化 CTLE gDC/gDC2（二维网格搜索）
CONF:CTLE:GAIN:MIN/MAX <dB>	CTLE gDC 优化下限/上限（优化器严格遵守）
CONF:CTLE:GAIN2:MIN/MAX <dB>	CTLE gDC2 优化下限/上限（3-Pole）
CONF:RXFFE:ENAB ON|OFF	RX FFE 开关
CONF:RXFFE:PRE 1	RX FFE Pre-cursor tap 数量
CONF:RXFFE:POST 2	RX FFE Post-cursor tap 数量
CONF:RXFFE:SPAC 1.0	RX FFE Tap 间隔 (UI)
CONF:RXFFE:TAPS 0.0,1.0,0.0,0.0	设置 RX FFE tap 系数
CONF:RXFFE:OPT	自动优化 RX FFE tap 系数
CONF:RXFFE:OPTJ	联合优化 RX FFE + DFE tap 系数
CONF:RXFFE:PRESET PCIE7	RX FFE 协议预设 (PCIe 128 GT/s 29-tap)
CONF:RXFFE:UNIT_MAIN ON|OFF	RX FFE 主 tap 归一化为 1.0
CONF:RXFFE:BMIN/BMAX <list>|NONE	RX FFE 每抽头下 / 上限 (预设或 COM 导入自动写入; 带 ? 回读)

命令	说明
CONF:RXFFE:MAIN_AUTO ON|OFF	RX FFE main tap 自动重划 pre / post
CONF:RXFFE:IND	RX FFE 自定义 tap 索引（采样单位）
CONF:RXFFE:FLOA:ENAB ON|OFF	启用/关闭浮动 FFE（自动搜索远端反射位置放置 tap 组）
CONF:RXFFE:FLOA:ENAB?	查询浮动 FFE 启用状态
CONF:RXFFE:FLOA:BMAXG <v>	设置浮动 FFE bmaxg 最大 tap 幅度 (0.01~1.0, 默认 0.2)
CONF:RXFFE:FLOA:BMAXG?	查询 bmaxg
CONF:RXFFE:FLOA:GRO <n>	设置 N_bg 浮动组数 (1/2/3)
CONF:RXFFE:FLOA:GRO?	查询 N_bg
CONF:RXFFE:FLOA:TPG <n>	设置 N_bf 每组 Tap 数 (1~12)
CONF:RXFFE:FLOA:TPG?	查询 N_bf
CONF:RXFFE:FLOA:SEAR <n>	设置 N_bmax 搜索范围 (20~200 UI)
CONF:RXFFE:FLOA:SEAR?	查询 N_bmax
CONF:RXFFE:FLOA:OPT	执行浮动 FFE 反射检测 + tap 提取（对应 GUI 按钮）
CONF:RXFFE:FLOA:DFE ON|OFF	启用/关闭浮动 DFE
CONF:RXFFE:FLOA:DFE?	查询浮动 DFE 状态
CONF:RXFFE:FLOA:DFE:BMAX G <v>	浮动 DFE bmaxg (默认 0.05)
CONF:RXFFE:FLOA:DFE:BMAX G?	查询
CONF:RXFFE:FLOA:DFE:GRO <n>	浮动 DFE N_bg
CONF:RXFFE:FLOA:DFE:GRO?	查询
CONF:RXFFE:FLOA:DFE:TPG <n>	浮动 DFE N_bf

命令	说明
CONF:RXFFE:FLOA:DFE:TPG?	查询
CONF:RXFFE:FLOA:DFE:SEAR <n>	浮动 DFE N_bmax
CONF:RXFFE:FLOA:DFE:SEAR?	查询
CONF:RXFFE:FLOA:DFE:DELT <v>	DFE DAC 量化步进 (CONF:DFE:STEP 的别名, 共享参数)
CONF:RXFFE:FLOA:DFE:DELT?	查询
CONF:RXFFE:FLOA:DFE:OPT	执行浮动 DFE 反射检测 + tap 提取（与 COM 参考实现一致）
CONF:RXFFE:FLOA:CTL <n> / :RSS:MAX <v> / :TAIL:STAR <n>	COM 浮动抽头参数 RXFFE_FLOAT_CTL / B_float_RSS_MAX / N_tail_start (导入自动写入; 带 ? 回读)
CONF:DFE:ENAB ON|OFF	DFE 均衡器开关
CONF:DFE:NTAP 4	DFE tap 数量 (1-32)
CONF:DFE:TAPS 0.1,0.05,0.02,0.01	DFE tap 系数（逗号分隔）
CONF:DFE:OPT	自动优化 DFE tap（支持 DAC 量化步进）
CONF:DFE:PRESET <name>	DFE 协议预设 (PCIE3..7 / USB3.2-Gen2 / USB4-Gen2/Gen3)
CONF:DFE:POS	DFE 浮动 tap 位置（UI 偏移）
CONF:DFE:STEP <v>	DFE DAC 量化步进 (对应 COM 配置的 DFE 量化步进, 共享 fixed+floating, 默认 0 = 连续)
CONF:DFE:STEP?	查询
CONF:DFE:BMIN/BMAX <list>|NONE	DFE 每抽头下 / 上限 (b_min / b_max; 带 ? 回读)
CONF:DFE:IMPL?	当前 DFE 是否为 COM 导入自动派生的隐式 1-tap (1/0)
CONF:NOIS:DM:FREQ0 100.0	注入点 0 的 DM 正弦噪声频率 (MHz)
CONF:NOIS:DM:AMP0 10.0	注入点 0 的 DM 正弦噪声幅度 (mVpp)

命令	说明
CONF:NOIS:CM:FREQ0 100.0	注入点 0 的 CM 正弦噪声频率 (MHz)
CONF:NOIS:CM:AMP0 10.0	注入点 0 的 CM 正弦噪声幅度 (mVpp)
CONF:NOIS:CM:CMRR 40.0	共模抑制比 CMRR (dB)
CONF:JITT:RJ 0.010	随机抖动 RJ 均方根 (UI)
CONF:JITT:SJ 100:0.1,...	正弦抖动 SJ 分量对 (频率_MHz:幅度_UI, 冒号分隔频率与幅度, 多对之间以逗号分隔; NONE 清空)
CONF:JITT:SSC:ENAB ON|OFF	抖动 SSC 开关
CONF:JITT:SSC:FREQ 33.0	抖动 SSC 频率 (kHz)
CONF:JITT:SSC:PPM 5000	抖动 SSC 频率偏移 (ppm)
CONF:JITT:SSC:MODE DOWN|CENTER	抖动 SSC 模式
CONF:CDR:ENAB ON|OFF	CDR 时钟恢复开关
CONF:CDR:TAPP POST|PRE	CDR 取数点（全链均衡后 / CTLE 后）
CONF:CDR:PDTY MM|BB	鉴相器类型（Mueller-Müller/Bang-Bang）
CONF:CDR:ORD 1|2	环路阶数（一阶/二阶）
CONF:CDR:BAND 10.0	环路带宽 (MHz)
CONF:CDR:DAMP 0.70	阻尼系数（二阶环路）
CONF:CDR:SSC:ENAB ON|OFF	CDR SSC 开关
CONF:CDR:SSC:FREQ 33.0	CDR SSC 频率 (kHz)
CONF:CDR:SSC:PPM 5000	CDR SSC 频率偏移 (ppm)
CONF:CDR:SSC:MODE DOWN|CENTER	CDR SSC 模式
CONF:CDR:KP <val>	CDR 比例增益（手动覆盖）
CONF:CDR:KI <val>	CDR 积分增益（手动覆盖）
CONF:CDR:PDG <val>	CDR 相位检测器增益
CONF:CDR:CLIP <val>	CDR 相位裁剪 (UI)

命令	说明
CONF:CDR:PHAS <val>	CDR 初始相位 (UI)
CONF:CDR:FREQ <val>	CDR 初始频率偏移
CONF:CDR:DEL <val>	CDR 锁定延迟（符号数）
CONF:LEV:ENAB ON|OFF	电平间距比例开关
CONF:LEV:RAT 1.0,1.0,...	电平间距比例 (逗号分隔)
CONF:FLEV:ENAB ON|OFF	强制电平开关
CONF:FLEV:VAL 0.25,0.75,...	强制电平值 (逗号分隔)
CONF:MEAS:DEC:T 0.10	判决点时间搜索半径 (UI)
CONF:MEAS:DEC:V 0.50	判决点电压搜索范围缩放因子
CONF:MEAS:HIT 100	眼图指标命中计数阈值
CONF:MEAS:VADJ 0.0	判决电平垂直微调 (V)
CONF:MEAS:TADJ 0.0	采样点时间微调 (UI)
CONF:MEAS:TCEN:LO/HI 0.0/1.0	时间中心搜索下 / 上界 (UI)
CONF:FEC:ENAB ON|OFF	启用 / 关闭 FEC 前后 BER 分析（需 FEC 选件或剩余计次）
CONF:FEC:ENAB?	查询 FEC 分析开关
CONF:MLSE:ENAB ON|OFF	MLSE 实测仅供预览验证，正式版本尚不开放（见 15.8）
CONF:MLSE:ENAB?	查询 MLSE 测量开关
CONF:MLSE:B1 <值>|DFE	部分响应系数 b1：DFE = 取 DFE 首抽头；数值 = 手动（|b1| ≤ 1）
CONF:MLSE:B1?	查询 b1 来源 / 数值
CONF:MLSE:TRAC 16..4096	Viterbi 回溯深度（UI），默认 128
CONF:MLSE:TRAC?	查询回溯深度
CONF:FEC:PRES "<预设>"	FEC 规范预设（七选一，见第15章）
CONF:FEC:PRES?	查询当前预设
CONF:FEC:LANes 1|2|4|8	物理 lane 数

命令	说明
CONF:FEC:LANes?	查询 lane 数
CONF:FEC:BADDed |DEF	外加 BER（DEF = 该预设的规范默认值）
CONF:FEC:BADDed?	查询外加 BER
CONF:COM:IMPORT "csv" "xlsx" [PEAK|PULSE]	COM 导入（CSV + Excel 配置文件）
CONF:COM:IMPORT:MLSERx ON|OFF	COM 导入：CSV 开 MLSE 的场景采用 COM 自己的接收机解（RxFFE 留 post-1 给 1+b1·D，隐式 1 抽头 DFE），默认 ON；见 15.8
CONF:COM:IMPORT:MLSERx?	查询该开关
CONF:COM:IMPORT (无参)	用已保存的 CSV / Excel / S4P 路径触发导入
CONF:COM:IMPORT:CSV/XLSX/S4P "path"	单独设置导入路径 (写入配置, 不触发导入; 带 ? 回读)
CONF:PKG:ENAB ON|OFF	封装模型开关
CONF:PKG:GAMMA0/A1/A2 <val>	传输线传播常数参数
CONF:PKG:TAU <val>	传播延迟 τ
CONF:PKG:Z0 <val>	参考阻抗 Z_0 (Ω)
CONF:PKG:RD:TX/RX <val>	驱动/接收阻抗 R_d (Ω)
CONF:PKG:{CBUMP|CP|CV}:{TX|RX} <val>	封装电容参数 (pF)
CONF:PKG:ZP:TX/RX	走线段长度 z_p (mm)
CONF:PKG:ZP:NEXT/FEXT	NEXT/FEXT 串扰通道 TX 端走线长度 (mm)
CONF:PKG:ZC	段阻抗 Z_c (Ω)
CONF:PKG:PCB:ENAB ON|OFF	PCB 板级走线开关
CONF:PKG:PCB:{ZBP:TX|ZBP:RX|ZC:RX|TAU|GAMMA}	PCB 走线参数
CONF:PKG:PCB:ZC:TX/RX <val>	PCB 阻抗 (TX/RX 分别, Ω)

命令	说明
CONF:PKG:PCB:ZBP:{NEXT|FEXT} <mm>	NEXT/FEXT 串扰 TX 端 PCB 长度
CONF:TX:GAUS:ENAB ON|OFF	TX 高斯上升时间滤波器开关
CONF:TX:GAUS:TR <ps>	TX 上升时间 Tr (ps)
CONF:CHAN:INT COM|CUBIC	插值模式（COM 幅/相或三次样条）
CONF:CHAN:CAUS:AP ON|OFF	COM 交替投影因果性 (推荐)
CONF:CHAN:CAUS ON|OFF	倒谱最小相位因果性 (强重建)。装载 S 参数时按实测因果健康度自动开/关本项并上报事件码 +303; 用户手动设置或COM 导入后自动控制让位, *RST 复位
CONF:NOIS:ADD	COM A_DD 数据依赖噪声
CONF:NOIS:ETA0 <val>	COM η_0 / DER 目标
CONF:NOIS:BER <val>	目标 BER（如 1e-4）
CONF:NOIS:SPECber <ber>	COM specBER (DER_0) 判决误码率目标
CONF:NOIS:SIGMA_RJ <UI>	COM σ_RJ 随机抖动（UI rms）
CONF:NOIS:SNR_TX <dB>	COM TX 信噪比 (dB)
CONF:NOIS:SNR_TX:WC0 ON|OFF	COM SNR_TXwC0：σ_TX 除以 TX FFE 主抽头 c0（发射噪声参考去加重前满摆幅；FETC:EYE:COM? 回读 SNR_TX_eff_dB / TX_c0）
CONF:NOIS:SIGMA_N <mV>	COM 接收端热噪声 σ_N (mV)
CONF:NOIS:BUDGetmap ON|OFF	预算噪声→眼图映射 (默认 ON; η_0/σ_N/A_DD/SNR_TX/σ_RJ 派生注入显示眼, 仅显示, COM_93A 不变, 优化器隔离)
CONF:SAMP:PHAS:METH <method>	采样相位方法
CONF:OPT:TYPE NM|GRID	优化器搜索算法 (Nelder-Mead / 网格搜索)
CONF:OPT:FFE:STEP <v>	网格搜索 FFE tap 步长 (0.005~0.05)
CONF:OPT:LOC:SEAR <n>	网格搜索局部细化范围

命令	说明
CONF:OPT:FOM COM	优化目标（恒为 COM；EYE 已停用）
CONF:OPT:CTLE:STEP <dB>	CTLE 增益优化步长
CONF:OPT:PREC LOW|MED|HIGH	优化采样精度 (会话偏好, 不随 *RST)
CONF:OPT:COM:TOPN <n>	COM 快速评估 top-N 游标数 (与菜单同源)
CONF:OPT:GRID:CAND <n>	网格搜索每阶段候选数上限
CONF:OPT:MEM:MAX <gb>	优化内存上限 (GB), 局部搜索候选数按抽头数换算
CONF:FFE|RXFFE|CTLE:OPT:ASYNc, CONF:FFE|RXFFE:OPTJ:ASYNc	优化异步变体 (启动即返回, 不阻塞)
FETC:OPT:STAT? / PROG? / ELAP?	异步优化状态 idle|running|done|failed|stopped / 进度 % / 耗时 s (亦可 ABORt)
CONF:TDR:WIND EXP|GAUS|...	设置 TDR 窗函数类型
CONF:TDR:WIND:PAR 1.0	设置窗函数参数 (β/α)
CONF:TDR:PORT:ROW <n>	TDR 端口行 (S 参数矩阵行号, 0 基)
CONF:TDR:PORT:COL <n>	TDR 端口列 (S 参数矩阵列号, 0 基)
CONF:TDR:VEL 0.7	设置速度因子
CONF:TDR:MODE / CAUS / REN / PEXT / EDGE:SMO / STEP:SMO	无头 TDR 参数: 模式、因果性、重归一、端口延拓、边沿 / 阶跃平滑 (与 GUI TDR 窗独立)
CONF:TDR:DC:METH / DC:VAL / BAND:EXT / CORR:IMP / DISP:ONEWAY	DC 外推方法 / 值、带宽外推、阻抗校正、单程显示
CONF:TDR:FREQ:STAR/STOP, TIME:STAR/STOP, GATE:STAR/STOP/STAT, WIND:MODE/COEF	频率 / 时间范围、门控、窗函数模式与系数
FETC:TDR:IMPU? / STEP?	TDR 冲激 / 阶跃响应数据
INIT:TDR	执行 TDR 计算

命令	说明
FETC:TDR:IMP?	查询 TDR 阻抗数组
FETC:TDR:TIME?	查询 TDR 时间轴
FETC:TDR:DIST?	查询 TDR 距离轴
INIT	启动眼图生成（异步）
ABOR	中止当前计算
FETC:EYE:COUN?	查询眼数量
FETC:EYE:HEIG? [n]	查询眼高 (V)
FETC:EYE:WIDT? [n]	查询眼宽 (UI)
FETC:EYE:AREA? [n]	查询眼面积 (V*UI)
FETC:EYE:ALL?	查询所有眼指标
FETC:EYE:COM?	查询 COM_93A + SNDR_93A 噪声预算 (协议 BER-cond/-inv)
FETC:EYE:VEO?	查询 VEO + SNR_REA + σ_eye (眼图统计 BER-inv)
FETC:EYE:CHAN?	查询信道质量指标（IL/拟合 IL/ILD/FOM_ILD/RL/延迟/PSXT/ICR/SDC21/SCD21/偏斜/h-1 h0 h+1/ISI，正损耗 dB，见 10.17.5）
CONF:DIFF:PAIR AUTO	S4P 差分配对自动猜测并写入（单文件 4 端口）
CONF:DIFF:PAIR:AUTO?	配对猜测：index,三方案得分,gap,cand=候选（不改设置）
CONF:WAVE:SAVE "path"	导出最近眼图的判决点波形捕获 CSV（流式/无捕获 → -221）
CONF:MASK:TYPE|EH|EW|EWVref	眼图模板形状 none|rect|diamond|hex / 高 V / 宽 UI / 参考线宽 UI（见 10.12.1）
CONF:CHAN:SKEW txp,txn,rxp,rxn	单端 p/n 偏斜（ps，COM 4.x Txpskew 等；4 端口信道混合模式前施加）；查询形式回读
CONF:CHAN:KAPPa k1,k2	差模反射缩放 kappa1/kappa2（0 = 忽略 tp0/tp5 反射）
CONF:NOIS:ACCM vrms[,fmax]	AC 共模噪声 AC_CM_RMS（V rms）与积分上限 ACCM_MAX_Freq（Hz，0 = fb）

命令	说明
CONF:CHAN:IRTRunc thr	COM 脉冲响应截断阈值（峰值比例；0 = 不截断；COM 导入按配置，缺省 1e-3）
CONF:NOIS:ICN mV	CSV ICN 高斯回退：无攻击者文件时 σ_XT = ICN·σ_x（COM 导入自动填；FETC:EYE:COM? 的 ICN_src）
FETC:EYE:BATH?	浴盆曲线摘要（EH@BER / EW@BER 各档 + σ；目标 BER = specBER 或 1e-12）
FETC:EYE:BATH:CURV? V|T[,n]	浴盆曲线数据 x:ber;...
FETC:EYE:MASK?	模板容限 PASS/FAIL、hits、上下左右裕量
FETC:FEC?	Normal 模式当前眼图的 FEC 结果（名称=值）
FETC:PIPE:FEC? <节点>	专家模式 fec 节点的 FEC 结果
FETC:MLSE?	Normal 模式当前眼图的 MLSE 实测增益（名称=值，两种口径）
FETC:PIPE:MLSE? <节点>	专家模式 mlse 节点的 MLSE 结果
FETC:RUNT?	查询运行耗时 (秒)
MEAS:EYE:ALL?	一键测量（INIT + 等待 + FETCH）
MEAS:EYE:HEIG? [n]	触发计算并返回眼高
CONF:XTALK:ENAB ON|OFF	启用/禁用串扰注入
CONF:XTALK:ADD:FEXT "path" [volt]	添加 FEXT 串扰路径（可选幅度 Vpp）
CONF:XTALK:ADD:NEXT "path" [volt]	添加 NEXT 串扰路径（可选幅度 Vpp）
CONF:XTALK:ICN:AMPL a_ft,a_nt	ICN 报告用攻击者幅度 A_ft/A_nt（V；0 = 同各路径幅度；只改 ICN 不改波形）
CONF:XTALK:CLEA	清除所有串扰路径
CONF:XTALK:COUN?	查询串扰路径数量
CONF:XTALK:LIST?	查询所有串扰路径

命令	说明
CONF:XTALK:PATH<n>:TXP <v>	设置第 n 条路径 TX 端口
CONF:XTALK:PATH<n>:RXP <v>	设置第 n 条路径 RX 端口
CONF:XTALK:PATH<n>:VOLT <v>	设置第 n 条路径幅度 (Vpp)
CONF:XTALK:PATH<n>:DELAY <v>	设置第 n 条路径延迟
CONF:XTALK:PATH<n>:{P1P|P1N|P2P|P2N} <n>	S4P 差分端口配对 (TX+/TX-/RX+/RX-)
CONF:XTALK:PATH<n>:DEL	删除第 n 条路径
MEAS:XTALK:ICN?	查询总 ICN (mV)
MEAS:XTALK:FEXT?	查询 FEXT ICN (mV)
MEAS:XTALK:NEXT?	查询 NEXT ICN (mV)
SYST:ERR?	查询错误队列（另有 SYST:ERR:ALL? / :COUN?）；负码 = 错误，正码 +301 = 优化裁决建议，+302 = 优化器事件 (未改善 / 内部降级 / 失败信息, 文案随界面语言)
SYST:ERR:NEXT? / ALL? / COUN?	错误队列: 下一条 / 全部 / 计数
STAT:OPER|QUES:COND? / EVEN? / ENAB	IEEE 488.2 状态寄存器（操作 / 可疑）: 条件、事件、使能 (另有 STAT:PRES)
*ESE / *ESR? / *SRE / *STB?	标准事件 / 状态字节寄存器 (IEEE 488.2)
SYST:VERS?	查询 SCPI 版本
SYST:HELP:HEAD?	查询所有支持的命令
SYST:CONF:LOAD ""	载入 REA 配置文件（与菜单 文件→载入配置 同一入口；含 Expert 管线的档自动切换模式并重建画布；档内 S 参数按同目录同名回退）
SYST:CONF:SAVE ""	保存 GUI 当前配置，包括 Normal FEC/MLSE 和 Expert 管线；与菜单保存配置使用同一入口

命令	说明
SYST:LANGuage zh_CN|en_US / SYST:LANG?	即时切换或查询 GUI 语言，保留当前参数与结果
DISP:PAGE SIGNAL|MEASUREMENTS|RESULTS / DISP:PAGE?	选择或查询 Normal 左侧参数页
DISP:STAGe SIGNAL|TXFFE|FILTER|CTLE|CDR|RXFFE|DFE / DISP:STAG?	选择或查询信号链参数页；导航不改变模块启用状态
INIT:PAUSe ON|OFF / INIT:PAUS?	暂停、继续或查询 Normal 眼图生成；SCPI 与 GUI 暂停按钮共用运行状态
DISP:FEC:LIVE ON|OFF / DISP:FEC:LIVE?	设置或查询当前模式 FEC 结果面板的实时更新开关
DISP:FEC:PROBe "" / DISP:FEC:PROB?	选择或查询 Expert FEC 结果探针
DISP:FEC:UPDate / DISP:FEC:CANCel	更新或取消 FEC 结果计算，与面板按钮相同
DISP:FEC:PAUSe ON|OFF / DISP:FEC:PAUS?	暂停、继续或查询 FEC 结果更新任务
DISP:FEC:SAVE ""	导出当前 FEC 指标和分箱，与面板保存 CSV 使用同一入口
SYST:GPU ON|OFF	启用/停用 CUDA 加速（同步 GUI 菜单勾选）
SYST:GPU?	查询 GPU 状态（ON / OFF / OFF,UNAVAILABLE）
SYST:HW:CORE <n>	CPU 核数上限（0=自动）
SYST:HW:RAM <gb>	内存上限 GB（0=自动）
SYST:HW:VRAM <gb>	显存上限 GB（0=自动）
SYST:OOM:POL IGNORE|STOP	内存告警时的默认处置（无对话框场景）
SYST:FEED "<text>"	发送一条意见反馈（自动附带版本/系统/Host ID/授权状态；SCPI 侧不传截图）
SYST:FEED:CONT "<联系方式>"	留邮箱或微信号，便于作者回复
SYST:FEED:ONL?	反馈服务是否在线（1/0）——离线属常态，先探再发
SYST:FEED:REPL?	取作者/机器人的回复（JSON 数组，最近 20 条）

命令	说明
LIC:HOST?	查询 Host ID（用于在 keygen 生成 Key）
LIC:BASE?	查询永久基础 Key 是否激活（1/0）
LIC:PAM?	查询 PAM-N 选件是否激活（1/0）
LIC:SCPI?	查询 SCPI 选件是否激活（1/0）
LIC:FEC?	FEC 选件是否已激活（1/0）
LIC:TRI?	查询试用/临时次数：remaining,total,bonus
LIC:STAT?	查询完整授权状态（HOST/BASE/PAM/SCPI/REM/TOT/BON）
LIC:ACT:BASE "<key>"	激活永久基础 Key
LIC:ACT:PAM "<key>"	激活 PAM-N 选件 Key
LIC:ACT:SCPI "<key>"	激活 SCPI 选件 Key（激活后 INIT/MEAS/OPT 等执行型命令立即放行）
LIC:ACT:FEC ""	激活 FEC 选件（需先有基础授权）
LIC:ACT:TEMP "<key>"	激活临时 Key（不解锁 SCPI）
LIC:ACT:LAST?	查询上次激活/解除结果（"1,success_msg" 或 "0,error_msg"）
LIC:DEAC:BASE	解除基础授权（同时清除所有选件）
LIC:DEAC:PAM	仅解除 PAM-N 选件
LIC:DEAC:SCPI	仅解除 SCPI 选件（注意：当前 SCPI 连接将被关闭）
LIC:DEAC:FEC	仅解除 FEC 选件
LIC:DEAC:TEMP	清除临时 bonus

13.2.2 专家模式管线与 IBIS-AMI 命令

专家模式（第 11 章）的画布可完全程控：节点增删、连线、参数、运行与逐探针取数。节点类型与参数名同画布对话框（参数名见各节点对话框的提示）。

命令	说明
CONF:MODE NORMAL|EXPERT	切换标准 / 专家模式；CONF:MODE:COPY 把当前 Normal 配置复制成画布

命令	说明
CONF:PIPE:CLEAR	清空画布
CONF:PIPE:NODE:ADD <type>[,<id>]	添加节点 (source/sparam/package_tx/package_rx/pcb/ffe/rx_filter/ctle/dfe/cdr/noise/fext/next/eo/fiber/oe/tdecq/eecq/ibis/fec/mlse/probe)
CONF:PIPE:NODE:DEL <id>	删除节点
CONF:PIPE:NODE:PAR <id>,<key>,<value>	设置节点参数（值可含逗号，如 ibis 的 ami_params JSON）
CONF:PIPE:NODE:PAR? <id>,<key>	查询节点参数
CONF:PIPE:CONN <from>,<to> / DISC	连接 / 断开
CONF:PIPE:LAYOUT	自动布局
CONF:PIPE:VAL?	校验画布：OK 或以 | 分隔的 ERROR/WARNING 列表
CONF:PIPE:LIST? / EDG?	节点清单 id:type;... / 边 from->to;... (含串扰 / 噪声注入边)
CONF:PIPE:OPT <node>[,NM|GRID]	旧式模块级优化 (自动取下游探针)
CONF:PIPE:OPT:PAUS ON|OFF (+?)	暂停 / 恢复进行中的异步 Expert 优化
FETC:PIPE:OPT? / :STAT? / :PROG? / :ELAP?	最近一次 Expert 优化结果 JSON / 状态 / 进度 % / 耗时 s
ABOR:PIPE:OPT	取消进行中的 Expert 优化
CONF:PIPE:RUN	运行整条管线（阻塞；*OPC? 等待）
CONF:PIPE:RUN:ASYN	异步运行，与 GUI 共用后台任务；同一 TCP 会话可继续控制和查询
FETC:PIPE:RUN:STAT?	异步 / GUI 运行状态：idle、running、paused、done、failed、cancelled
CONF:PIPE:RUN:PAUS ON|OFF / :PAUS?	暂停 / 继续 / 查询 Expert 运行，与 GUI 共用控制；远程运行先用 RUN:ASYN

命令	说明
ABOR:PIPE:RUN	停止 GUI 或 SCPI 发起的 Expert 运行；同一会话中停止命令优先处理
CONF:PIPE:OPT:CTLE|FFE|DFE <probe>,<node>	按探针链优化单个均衡节点
FETC:PIPE:PROB?	探针列表
FETC:PIPE:EYE? <probe>	探针眼图指标（eye_height/eye_width/com_db/…；IBIS 链附 ibis_flow/rx_clock_src/ibis_links/ami_rx_out 等字段）
FETC:PIPE:EYE:REP? <probe>	探针结果面板文本（与 GUI 指标面板同一渲染，行以 | 分隔）
FETC:PIPE:CHAN? <probe>	探针链路的信道质量指标（与 FETC:EYE:CHAN? 同口径；光域探针 available=0）
CONF:PIPE:WAVE:SAVE <probe>,"path"	导出探针判决点波形捕获 CSV（多眼视图右键同源）
FETC:PIPE:BATH? <probe> / :BATH:CURV? <probe>,V|T[,n] / :MASK? <probe>	探针浴盆曲线摘要 / 曲线数据 / 模板容限（与 FETC:EYE:* 同口径，模板用全局 CONF:MASK 配置）
FETC:PIPE:MASK? <probe>	探针的模板容限结果
FETC:PIPE:IBIS? <ibis 节点>	IBIS 节点解析摘要：模型/线性化值/封装来源与明细（package_detail=matrix:coupled|sections:N，interconnect_kind=ts|iss）/[C Comp Model]（c_comp_model=ts|iss|lumped）/.ami 保留参数/抖动表/Supporting_Files/DLL 导出/规范核对/测试配置（不执行模型）
FETC:PIPE:IBIS:TEST? <ibis 节点>[,<配置名>]	运行 .ibs 的 [AMI Test Configuration] 并与 golden 数据比对（ok=1|0 及各项误差）
FETC:PIPE:FEC? <fec 节点>	FEC 前后误码率
FETC:PIPE:MLSE? <mlse 节点>	MLSE 判决器实测增益（对拍 COM / 真实 DFE 两口径）

IBIS 节点常用参数：side (tx\|rx)、file_path (.ibs)、model_name、pin、corner、package_source (auto\|lumped\|package_model\|interconnect)、use_analog、use_ami、ami_file_path、dll_file_path、flow

(auto|init|getwave)、ami_params (JSON)、getwave_block_ui、ignore_bits、use_ami_jitter、tx_getwave_rx_init (auto|deconvolve|unit_impulse|skip_tx_getwave)、interconnect_group、c_comp_source (auto|lumped)、repeater_type (auto|redriver|retimer)、bci_training (auto|off|on)。FETC:PIPE:EYE? 的 IBIS 字段另含 ibis_tx_pkg_detail / ibis_tx_ccomp / ami_tx_dll_id / ibis_jitter_table（tx/rx 同）。示例：

CONF:MODE EXPERT

CONF:PIPE:CLEAR

CONF:PIPE:NODE:ADD source,src ; CONF:PIPE:NODE:ADD ibis,ib_tx ; CONF:PIPE:NODE:ADD sparam,sp1

CONF:PIPE:NODE:ADD ibis,ib_rx ; CONF:PIPE:NODE:ADD probe,pr1

CONF:PIPE:CONN src,ib_tx ; CONF:PIPE:CONN ib_tx,sp1 ; CONF:PIPE:CONN sp1,ib_rx ; CONF:PIPE:CONN ib_rx,pr1

CONF:PIPE:NODE:PAR sp1,file_path,D:/models/channel.s4p

CONF:PIPE:NODE:PAR ib_tx,side,tx ; CONF:PIPE:NODE:PAR ib_tx,file_path,D:/models/vendor.ibs

CONF:PIPE:NODE:PAR ib_rx,side,rx ; CONF:PIPE:NODE:PAR ib_rx,file_path,D:/models/vendor.ibs

CONF:PIPE:NODE:PAR ib_rx,ami_params,{"ctle_gain_db": 6}

CONF:PIPE:NODE:PAR ib_tx,package_source,interconnect ; CONF:PIPE:NODE:PAR ib_tx,interconnect_group,REA_IC_GROUP_ISS

CONF:PIPE:NODE:PAR ib_rx,c_comp_source,auto ; CONF:PIPE:NODE:PAR ib_tx,tx_getwave_rx_init,auto

FETC:PIPE:IBIS? ib_rx ; CONF:PIPE:VAL? ; CONF:PIPE:RUN ; *OPC? ; FETC:PIPE:EYE? pr1

13.2.1 新机器首次激活流程

在尚未激活 SCPI 选件的机器上，可完全通过 SCPI 完成授权（无需打开 GUI）：

*IDN? # 验证连接

LIC:HOST? # 取本机 Host ID

（在 keygen 工具中根据 Host ID 生成 base / SCPI Key）

LIC:ACT:BASE "<完整基础授权 Key>" # 激活基础

LIC:ACT:SCPI "<完整 SCPI 选件 Key>" # 再激活 SCPI 选件

LIC:STAT? # 验证全部激活

INIT # 现在 INIT/MEAS/OPT 全部放行

> **提示：**激活失败时：旧 Key 保留（已激活的不会被清空），错误推到 SYST:ERR? 队列；LIC:ACT:LAST? 可获取详细成功/失败说明。选件 Key（PAM/RE/SCPI/TEMP）需先激活基础 Key。

13.3 S 参数分析窗口控制

以下命令用于通过 SCPI 远程打开、操控和关闭 S 参数分析窗口。每个窗口拥有唯一整数 ID，支持同时打开多个同类型窗口。SCPI
模式下打开的窗口不恢复上次手动操作的设置，保证状态干净可控。

13.3.1 窗口管理

命令	说明
WIND:OPEN CASC|CONV|DEEM|SPLI|TDR|SMIT	打开 S 参数分析窗口，返回窗口 ID
WIND:OPEN?	查询当前打开的窗口类型
WIND:CLOSe <id>	关闭指定窗口
WIND:LIST? [type]	查询所有窗口（可选按类型筛选）

13.3.2 格式转换 (Converter)

命令	说明
CONF:CONV:FILE <id>,"path"	加载 S 参数文件
CONF:CONV:PORT:ENAB <id>,ON|OFF	端口提取开关
CONF:CONV:PORT:PERM <id>,1,3,2,4	设置端口排列顺序
CONF:CONV:DIFF:ENAB <id>,ON|OFF	差分转换开关
CONF:CONV:DIFF:PAIR <id>,SEQ|CROSS13|...	差分端口配对模式
CONF:CONV:DIFF:P1P/P1N/P2P/P2N <id>,n	差分端口索引
CONF:CONV:DIFF:OUTP <id>,SDD|SDC|...	差分输出模式

命令	说明
INIT:CONV <id>	执行格式转换
CONF:CONV:SAVE <id>,"path"	保存转换结果

13.3.3 级联 (Cascade)

命令	说明
CONF:CASC:FILE:ADD <id>,"path"	添加 S 参数文件到级联列表
CONF:CASC:FILE:CLEar <id>	清空文件列表
CONF:CASC:FILE:LIST? <id>	查询当前文件列表
CONF:CASC:PORT:ENAB <id>,ON|OFF	端口映射开关
CONF:CASC:PORT:IN1/IN2/OUT1/OUT2 <id>,n	设置 WCM 端口映射 (S4P; 混合级联时兼作 Sdd 提取对)
CONF:CASC:S2Port:IN/OUT <id>,1|2	S2P 段方向 (IN=2 → 该类段镜像)
CONF:CASC:DIFF:ENAB <id>,ON|OFF	差分转换开关
CONF:CASC:DIFF:PAIR/P1P/P1N/P2P/P2N/OUTP	差分参数（同 CONV）
INIT:CASC <id>	执行级联计算
CONF:CASC:SAVE <id>,"path"	保存级联结果

13.3.4 去嵌 (De-embed)

命令	说明
CONF:DEEM:DUT <id>,"path"	加载被测件（DUT）文件
CONF:DEEM:LEFT:ENAB <id>,ON|OFF	左侧夹具开关
CONF:DEEM:LEFT:FILE <id>,"path"	加载左侧夹具文件

命令	说明
CONF:DEEM:RIGH:ENAB <id>,ON|OFF	右侧夹具开关
CONF:DEEM:RIGH:FILE <id>,"path"	加载右侧夹具文件
CONF:DEEM:PORT:ENAB <id>,ON|OFF	端口映射开关
CONF:DEEM:PORT:IN1/IN2/OUT1/OUT2 <id>,n	设置 WCM 端口映射
CONF:DEEM:DIFF:ENAB/PAIR/P1P/.../OUTP	差分参数（同 CONV）
INIT:DEEM <id>	执行去嵌计算
CONF:DEEM:SAVE <id>,"path"	保存去嵌结果

13.3.5 分割 (Splitter)

命令	说明
CONF:SPLI:FILE <id>,"path"	加载 S 参数文件
CONF:SPLI:NSEG <id>,n	设置分割段数
CONF:SPLI:RAT <id>,r1,r2,...	设置各段比例（逗号分隔）
CONF:SPLI:SMOO:ENAB <id>,ON|OFF	平滑滤波开关
CONF:SPLI:SMOO:WIND <id>,n	平滑窗口大小
CONF:SPLI:PORT:ENAB <id>,ON|OFF	端口映射开关
CONF:SPLI:PORT:IN1/IN2/OUT1/OUT2 <id>,n	设置 WCM 端口映射
CONF:SPLI:DIFF:ENAB/PAIR/.../OUTP	差分参数（同 CONV）
INIT:SPLI <id>	执行分割计算

命令	说明
FETC:SPLI:COUN? <id>	查询分割结果段数
CONF:SPLI:SAVE <id>,idx,"path"	保存指定段的结果
CONF:SPLI:SAVE:ALL <id>,"dir"	批量保存全部段到目录

13.3.6 GUI TDR

命令	说明
CONF:GTDR:FILE <id>,"path"	加载 S 参数文件
CONF:GTDR:WIND <id>,kaiser|...	设置窗函数类型
CONF:GTDR:WIND:PAR <id>,value	设置窗函数参数
CONF:GTDR:VEL <id>,0.65	设置速度因子
CONF:GTDR:PORT / CAUS / REN / PEXT / DISP / EDGE:SMO / GATE:STAT/STAR/STOP/TYPE	端口、因果性、重归一、端口延拓、显示模式、边沿平滑、门控 (均带 <id>)
CONF:GTDR:DIFF:ENAB/PAIR/OUTP	差分参数
INIT:GTDR <id>	执行 TDR 计算
CONF:GTDR:SAVE <id>,"path.csv"	保存 TDR 结果为 CSV

13.3.7 Smith 圆图

命令	说明
CONF:SMIT:FILE:ADD <id>,"path"	添加 S 参数文件
CONF:SMIT:FILE:CLEar <id>	清空文件列表
CONF:SMIT:FILE:LIST? <id>	查询文件列表

命令	说明
CONF:SMIT:PARAM <id>,S11|S21|...	设置显示参数
CONF:SMIT:CHARt:TYPE <id>,Z|Y	图表类型 (Z 阻抗 / Y 导纳)
CONF:SMIT:ZREF <id>,<ohm>	参考阻抗 (50/75/100Ω 等)
CONF:SMIT:VSWR <id>,ON|OFF	VSWR 等高圆显示
CONF:SMIT:DIFF:ENAB/PAIR/OUTP	差分参数
INIT:SMIT <id>	绘制 Smith 圆图

13.3.8 S 参数分析工作流示例

以 2 端口级联为例：

1. WIND:OPEN CASC — 打开级联窗口，返回窗口 ID（如 1）
2. CONF:CASC:FILE:ADD 1,"file1.s2p" — 添加第 1 个文件
3. CONF:CASC:FILE:ADD 1,"file2.s2p" — 添加第 2 个文件
4. INIT:CASC 1 — 执行级联
5. CONF:CASC:SAVE 1,"result.s2p" — 保存结果
6. WIND:CLOS 1 — 关闭窗口

> **提示：** *RST 命令会关闭所有 SCPI 打开的 S 参数分析窗口。

13.4 眼图典型使用流程

> **提示：** 随附的 demo/scpi_example.txt 包含本节完整命令序列（含逐级均衡与 COM 一键导入两个流程），把其中 <DEMO> 替换为演示文件夹路径后即可逐行对照发送。

以下为 Python 眼图自动化脚本示例：

1. 连接 SCPI 服务器（socket connect）
2. CONF:FILE "channel.s4p" — 加载 S 参数文件
3. CONF:SIGN:TYPE PAM4 — 设置信号类型
4. CONF:SIGN:RATE 56.0 — 设置数据率

5. CONF:FFE:ENAB ON; CONF:FFE:OPT — 启用并优化 FFE
6. MEAS:EYE:ALL? — 一键测量，返回所有眼指标
7. FETC:EYE:HEIG? 1 — 查询第 1 个眼的眼高

提示：FETC:EYE:HEIG?、FETC:EYE:WIDT?、FETC:EYE:AREA? 后接数字 n 表示查询第 n 个眼（1-based），不带参数则返回所有眼的值（逗号分隔）。

注意：SCPI 服务器为单客户端模式（同一时间仅允许一个连接）。如需多客户端并发访问，请自行实现代理/排队机制。

第14章 常见问题与故障排除

Q: 眼图生成失败，提示"S 参数带宽不足"

A: 眼图眼高受 S 参数带宽影响，带宽需显著高于数据率。请使用覆盖更高频率范围的 S 参数文件，或降低数据率设置。

Q: 试用次数已用完

A: 请联系供应商获取授权 Key。在"授权 → 授权管理"中查看 Host ID 并提供给供应商。临时 Key 可立即增加运行次数并解锁全部功能。

Q: PAM-N 信号类型不可选

A: PAM-N 眼图在试用计次用完后需要 PAM-N 选件或临时授权。请在"授权 → 授权管理"中激活 PAM-N 选件 Key 或临时 Key。

Q: CUDA 加速开关不可用

A: 需要同时满足：(1) 安装了 CuPy（pip install "cupy-cuda12x[ctk]==14.0.1"）；(2) 系统有 NVIDIA GPU。CUDA 加速对所有用户免费开放，与授权无关。可通过"工具 → CUDA 加速状态"查看详细检测信息。

Q: 级联/去嵌后曲线不正常

A: 请检查 S 参数文件的端口数和端口顺序是否正确。级联顺序错误或端口定义不匹配都会导致结果异常。

Q: 4 端口分割在某些频率出现小凸起

A: 在特征值相位经过奇数倍 π 的谐振频率处可能出现 <2% 的幅度凸起，这是物理谐振特性，不是 bug。两段级联还原精度 ~1e-13。

Q: S 参数分析窗口无响应

A: 长时间计算任务（如高阶 PRBS 眼图）使用异步线程执行，不应阻塞 UI。如果 UI 无响应，可能是内存不足。尝试降低 PRBS 阶数或关闭其他窗口。

Q: 如何查看操作手册

A: 点击菜单栏"帮助" → "操作手册"，将自动生成并打开 PDF 格式的操作手册。首次生成需要安装 reportlab 包（pip install reportlab）。

提示：如果遇到本手册未涵盖的问题，请检查状态栏和控制台输出中的详细信息。

第15章 FEC 前后误码率分析

高速链路都靠 FEC (前向纠错) 把物理层的误码压到系统可接受的水平, 所以"眼图好不好"最终要落到"纠错前的误码率是多少、纠错之后还剩多少"。本章介绍的 FEC 分析会在眼图下方直接给出这两个数, 并按 IEEE 802.3 / PCIe 的对应规范判定是否达标。

FEC 分析是**选件功能**, 与 PAM-N、SCPI 同级 (见第4章); 试用期内可以正常使用。

15.1 启用与基本用法

1. 先正常生成一张眼图 (第3章~第7章)。FEC 结果基于该眼图的判决点统计, 所以要先有眼图。
2. 打开左侧"测量 / FEC"页，在"FEC 分析"分组中勾选启用。

   → GUI 反馈：FEC 分组中设置编码预设、物理通道数与附加 BER
3. 选择与被测链路对应的规范预设 (见 15.2)。
4. 眼图下方出现 FEC 结果条带: 上排四张指标卡片, 下方是错误分布直方图。

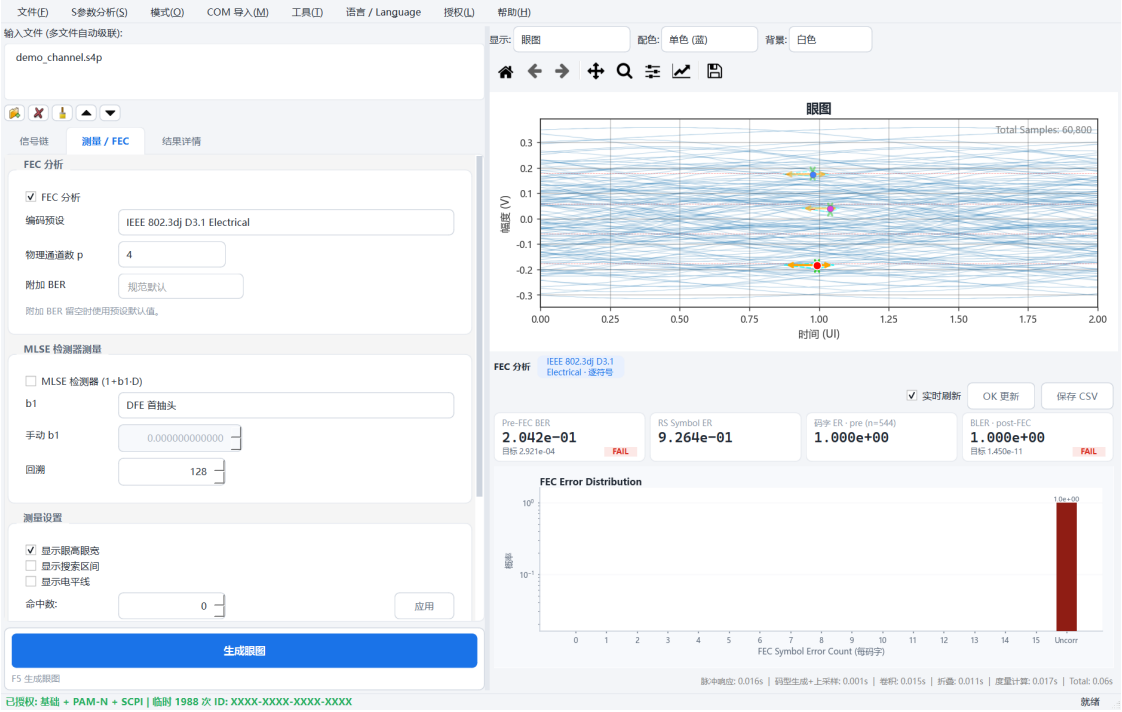

图 15-1 眼图下方的 FEC 结果条带

> **提示：**拖动眼图上的判决点, FEC 结果会跟着更新 —— 可以直观看到判决门限选得好不好对纠错前误码率的影响。码型很长时可以取消"实时刷新", 改用"OK 更新"按钮手动触发。

15.2 规范预设

预设决定用哪一套 FEC 参数与达标判据。选错预设不会报错, 但判定结果没有意义, 请按被测链路实际使用的标准选择:

预设	纠错码	调制	典型适用
IEEE 802.3dj D3.1 Electrical	RS(544,514)	PAM4	200G/lane 电接口
IEEE 802.3ck 100G/lane	RS(544,514)	PAM4	100G/lane 电接口
IEEE 802.3bs Clause 119	RS(544,514)	PAM4	200G/400G
IEEE 802.3 Clause 91 KR4	RS(528,514)	NRZ	100GBASE-KR4/CR4
IEEE 802.3 Clause 74 BASE-R	(2112,2080)	NRZ	10G/25G-KR/CR
PCIe 6/7/8 FLIT	FLIT FEC	PAM4	PCIe 6.0/7.0/8.0
IEEE 802.3dj IM-DD Optical Inner FEC	Hamming(128,120)	PAM4	800G/1.6T DR/FR/LR 光口内码

Lane 数按被测链路的物理通道数填 (1/2/4/8), 它影响以太网测试块的划分口径。**Clause 74** 预设只适用于 NRZ 链路 —— 选了 PAM4 会明确报错而不是给出一个错误的数。**IM-DD Optical Inner FEC** 预设输出内码前 BER (实测) 与内码后 BER (t=1 保证界模型, 判据 2.281e-4, 不含 RS(544,514) 外码); 光链路要求 inline TDECQ 拓扑 (tdecq→…→probe→fec), 测量点 = TDECQ 参考接收机均衡后的眼; 电链路沿用逐符号机制。

15.2.1 BERadded

BERadded 是"外加误码率": 做接收机干扰容限测试时, 测试设备会往信号里注入规定量的损伤, 这部分误码要计入总账。留空即使用所选预设的规范默认值 (dj 预设为 0, 与该规范自身给出的目标值同一口径); 做 802.3dj 178.2 的接收机干扰容限测试时填 1.6e-5。

15.3 结果怎么读

以太网预设 (RS-FEC) 下, 四张卡片依次是:

- **Pre-FEC BER** —— 纠错前的比特误码率, 也就是链路"生"的误码水平。卡片下方标出该规范的目标值, 达标显示 PASS, 否则 FAIL。
- **RS Symbol ER** —— 纠错前的 RS 符号错误率。
- **码字 ER • pre** —— 纠错前一个码字里出现错误的概率。
- **BLER • post-FEC** —— **纠错后**的码字错误率, 即 FEC 纠不过来的比例。这是以太网规范真正的判据 (如 802.3dj 要求低于 1.45e-11)。

Clause 74 预设的四张卡片改为: Pre-FEC BER / 块错误率·纠前 / 不可纠块率 / post-FEC BER。PCIe 预设改为: FBER / 字节错误率 / FLIT 错误率·纠前 / FLIT 错误率·纠后。

下方的**错误分布直方图**给出每个码字里出现 k 个错误符号的概率 (横轴 0、1、2 …, 最右一根是"超出纠错能力"的部分)。多 lane 交织时按解码器实际看到的交织码字统计, 与 BLER 判据同口径。柱子越靠左说明余量越足; 最右一根一旦抬起来,

就是已经开始出现纠不回来的码字了。

> **提示：**"保存 CSV"会把四张卡片的数值和整条分布一起导出，便于做多组对比。

15.4 关于码型与计算量

FEC 结果是按**真实码型逐符号**统计出来的，而不是用一个平均误码率去套公式——因此换一个码型 (PRBS13 / PRBS31 / SSPRQ) 结果会不同，这正是真实链路的行为。从 PRBS7 到 PRBS31 的完整周期都可以计算（PRBS31 是十亿量级的符号数），长码型会自动使用 GPU 加速 (需在"工具"菜单启用 GPU)。

> **注意：**很长的码型 (PRBS27/PRBS31) 单次计算需要数秒到数十秒，结果条带会显示进度，可以随时暂停或取消。此时建议关闭"实时刷新"，调完判决点再点"OK 更新"。

15.4.1 抖动与噪声如何计入

注入的白噪声与抖动（RJ / SJ / SSC）都会如实反映在逐符号统计里，因此可以直接用"逐档加大压力 + 读 FEC 前后误码率"的方式做接收机容限类的桌面预判。

抖动默认按**未被时钟恢复跟踪**的采样相位计入——这是最保守的口径，注入多少就计入多少。启用 CDR 后为另一种口径：环路带宽以内的抖动被跟踪吸收，带宽以外仍足额计入，两种口径可直接对比。若均衡后的眼不足以支撑时钟恢复，CDR 会安全停用并给出"标定退化"提示（见 10.9.2）。

15.5 专家模式

专家模式下 FEC 是一个可以挂在探针后面的节点：从左侧选板拖入 "FEC" 节点，连到某个 Eye Probe 之后即可。运行管线后，该探针的眼图下方同样显示 FEC 结果条带；多个探针时用条带左上角的下拉框切换看哪一个。

节点参数与 Normal 模式一致 (预设 / lanes / BERadded)。

15.6 SCPI 控制

Normal 模式:

```
CONF:FEC:ENAB ON
CONF:FEC:PRES "IEEE 802.3dj D3.1 Electrical"
CONF:FEC:LANes 4
CONF:FEC:BADDed DEF
INIT
*OPC?
```

FETC:FEC?

专家模式 (fec 节点):

CONF:PIPE:NODE:ADD fec,f1

CONF:PIPE:CONN p1,f1

CONF:PIPE:RUN

FETC:PIPE:FEC? f1

查询返回一行 "名称=值" 形式的结果, 常用字段如下 (以太网预设):

字段	含义
status	OK 表示结果有效; 其余为状态说明 (见 15.7)
preset / standard / lanes	当前预设、标准族、lane 数
ser / pre_ber	纠错前符号错误率 / 比特误码率
rsser / bins / bler	RS 符号错误率 / 错误分布 / 纠错后码字错误率
target_pre_ber / target_post	该规范的两个目标值
pass_pre / pass_post	两项判定结果 (PASS / FAIL)
margin_pre_db / margin_post_db	相对目标值的余量 (dB)
coverage / n_rows	码型覆盖率 / 参与统计的符号数

PCIe 预设改为 p_byte / flit_pre / flit_post 等字段; Clause 74 预设为 block_pre / bler / post_ber。授权与计次规则见第4章。

15.7 结果状态与常见问题

状态 / 现象	含义与处理
数据不足	眼图样本或有效判决数据不足以做统计 —— 换更长的码型, 或确认判决点落在张开的眼内
眼图闭合	当前判决点处没有可用开口 —— 先把眼调开 (均衡/降速率)
光域探针暂不支持	FEC 分析目前只支持电域探针
该调制阶数无规范 FEC 映射	所选预设与当前调制不匹配 (如 Clause 74 只支持 NRZ)

状态 / 现象	含义与处理
结果全部 FAIL 且分布集中在最右	链路误码已远超该规范的纠错能力，属于预期结果，不是软件故障

15.8 MLSE 判决器测量（实测增益）

> **注意：**MLSE
> 实测模块尚未在正式版本开放。普通启动时不显示相关控件，也不支持添加 mlse 节点；启用命令会返回“本版本尚不可用”。以下说明仅供预览验证参考，不代表正式版本已支持。COM 结果导入和 CSV 中的 MLSE 标记仍可正常读取。

COM 4.x 开启 OP.MLSE 时，结果里的 ΔCOM 是 Annex 178A 的**解析**增益：按噪声统计和错误事件联合界估计 "理想 MLSE 相对 DFE 切片器多出的噪声余量"，不是波形仿真。REA 的 MLSE 测量块给出同一定义的**实测**值：在自己渲染的时域波形上取 DFE **之前**的判决点样本，用 1+b1·D 部分响应网格（b1 = DFE 首抽头，L 个状态，回溯 N_tc）真跑 Viterbi 检测器，并与同一波形上的 DFE 切片器硬计数比较。

两种口径同时给出：

- **对拍 COM**（genie）：DFE 尾抽头 b2..bN 用真值理想消除，切片器参考 = 无误码传播的理想 DFE —— 与 COM 的 DER_DFE / ΔCOM 假设一致，可直接与 CSV 的 delta_COM 对照；
- **真实 DFE**：尾抽头用各幸存路径自己的判决（含误码传播），切片器参考 = 真实 DFE —— 更接近真实接收机。

增益定义与 ΔCOM 相同：把按真值剥出的**真实噪声实现**（含残余 ISI、抖动折算、非高斯成分）整体缩放，二分到目标符号错误率（source 的 specBER，缺省 1e-4），两检测器所能承受的缩放比之比 = 噪声余量增益 gain_margin_db = 20·log10(g_MLSE / g_slicer)；另附 as-rendered 的 SER 硬计数与 Q 等效增益。结果只与真实波形有关，不做解析近似。

预览环境中的使用方法（正式版本不开放）：

- **Normal 模式**：左侧"眼图指标"区勾选"MLSE 检测器（1+b1·D)"，选择 b1 来源（DFE 首抽头 / 手动）与回溯深度，生成眼图后指标面板出现两行 "MLSE（...)"；COM 导入且 CSV 含 MLSE 时同一行带 "[CSV ΔCOM x.xx dB]" 便于对照。
- **专家模式**：在探针之后挂 **mlse** 节点（与 fec 节点可共存，每探针各一个），RUN 后结果附在该探针的指标文本里。
- SCPI：CONF:MLSE:ENAB / B1 / TRAC 与 FETC:MLSE?（Normal），FETC:PIPE:MLSE? <节点>（专家），令牌含 b1 / b1_fit / n_syms / target_ser 与 genie_* / surv_* 两组（ser_slicer、ser_mlse、gain_q_db、g_slicer、g_mlse、gain_margin_db、ok）以及 csv_delta_com_db。

注意事项：需要 DFE（或手动 b1）；统计门槛 = 目标误码率下至少 20 个误码，短码型会报"数据不足"并给出所需符号数（PRBS20 及以上通常足够）；仅电域探针；授权与计次与 FEC 分析相同（第4章）。

与 COM 对拍时注意接收机结构：COM 4.x 在 OP.MLSE 开启的场景部署的是它自己求解的 RxFFE，主游标后第 1 个残留 = MLSE 网格的 b1 （内部量 blim(1)，CSV 的 DFE_taps 列写 0）。REA 导入这类 CSV 时默认采用同一接收机（导入对话框"MLSE 场景用 COM 接收机解" / SCPI CONF:COM:IMPORT:MLSERx），并把该残留派生成 1 抽头 DFE，MLSE 测量块即以它为 b1。实测结果通常明显小于 CSV 的 ΔCOM：178A 模型把残余 ISI 当作带功率谱的平稳噪声进入错误事件联合界，而真实波形上残余 ISI 是确定性的、理想判决反馈已经消掉，检测器只能从真正的噪声成分里获益——这正是"解析"与"实测"的差别，两个数都保留供对照。

附录 A PLTS 对齐特性概览

本附录汇总 REA 与 Keysight PLTS 2024 U1 的对齐情况。所有 S 参数处理默认值与 PLTS Default Settings 一致, 用户开箱即得 PLTS 等价行为。

A.1 PLTS-aligned 默认值

模块	设置项	REA 默认 = PLTS 默认
TDR	窗类型	标称 (= PLTS Exponential, Coef 0.50)
TDR	窗模式	低通 (阶跃)
TDR	DC 外推	线性 (= PLTS Auto)
TDR	因果性校正	默认关 (PLTS 不强制)
TDR	速度因子	0.70
TDR	显示内容	阻抗 (= PLTS Step Impedance)
级联/去嵌/分割	4 端口顺序	相邻配对 P1,P3 → P2,P4 (= PLTS Adjacent)
Gating	Gate 模式	Bandpass (= PLTS Bandpass)
Smith	图类型	阻抗图
Smith	参考阻抗	50Ω 单端 (差分自动 100Ω)
Smith	VSWR 圆	开 (1.5/2/3/5)

A.2 TDR 输出格式 (PLTS plot 等价)

REA mode	PLTS 等价	描述
impedance	STEP_IMPEDANCE_NS	阻抗 Z (Ω)，默认
voltage	STEP_VOLTS_NS	电压 V (V_0=0.4V)
step	STEP_REAL_NS	阶跃反射系数 Γ
logmag	STEP_LOGMAG_NS	反射 log |Γ| (dB)
impulse	IMPULSE_REAL_NS	脉冲响应
impulse_logmag	IMPULSE_LOGMAG_NS	脉冲 log |h| (dB)

A.3 PLTS-equivalent 功能对照

REA 功能	PLTS 等价
TDR 页时域 Gating (见 9.3)	Tools → Time-Domain Gating
级联页「Reverse 后续网络」选项	Embedding "Reverse" checkbox
Smith 圆图导纳模式	Inverted Smith (admittance)
Smith 悬停 marker 读数 (Z/Γ/VSWR/dB/RL)	Marker readout
Smith VSWR 圆 + 参考阻抗自动切换	draw_vswr + 系统 Z0 配置

A.4 数值一致性

REA 与 PLTS 2024 U1 经过逐场景数值对比验证: 级联与去嵌结果在机器精度量级一致; 时域 Gating 与 TDR 阻抗曲线在典型场景下逐点吻合 (个别多段突变结构存在 Ω 级差异, 见 A.5); Smith 圆图读数逐字节一致。

A.5 残留差异说明

- **TDR transition 处 1-3Ω 差异**: 多段阻抗突变结构处, 两款工具的时域重建算法路线不同, 存在已知的小幅差异。
- **Multi-section 非对称比例 split**: 分割算法需将 multi-section 结构视为"等效均匀线", 属信息论限制 (任何此类工具都有)。
- **PLTS 短段 TDR 拒绝**: 极端比例 (r=0.1/0.9) 段电气长度过短, PLTS 内部不计算。

附录 B 术语表

本表面向初次接触信号完整性（SI）分析的读者，用通俗语言解释手册中出现的常用术语。

术语	通俗解释
S 参数	描述通道对各频率信号"透过多少、反射多少"的网络参数，由矢量网络分析仪测量或电磁仿真得到
Touchstone (.s2p/.s4p)	S 参数的标准文件格式，后缀数字为端口数
插入损耗 / 回波损耗	信号穿过通道的衰减 / 被反射回来的比例（dB）
差分信号 / Sdd	用一对反相信号传输数据；Sdd 是差分模式下的等效 2 端口 S 参数
端口配对	指定 4 端口文件中哪两个端口构成一个差分对
NRZ / PAM4	每符号 1 bit 的二电平 / 每符号 2 bit 的四电平调制
波特率 (Gbaud)	每秒传输的符号数；PAM4 的比特率 = 2 × 波特率
UI (Unit Interval)	一个符号占用的时间，眼图的横轴单位
眼图	把长比特流按符号周期切片叠加得到的统计图形——"眼睛"张得越开，信号质量越好
眼高 / 眼宽	眼图中央无信号轨迹区域的垂直 / 水平尺寸
ISI（码间干扰）	通道带宽不足使前后符号相互拖尾干扰，是高速链路眼图闭合的主因
PRBS	伪随机码型（如 PRBS7 长度为 2^7-1 位），用于模拟真实数据流
抖动（RJ / SJ）	信号边沿在时间上的随机 / 正弦规律偏移
SSC	扩频时钟——有意让时钟频率缓慢摆动以降低电磁辐射峰值
FFE	前馈均衡器：对当前符号前后的若干符号加权求和，预先抵消通道拖尾（TX 端或 RX 端）
pre/post-cursor	FFE 中位于主符号之前 / 之后的抽头
CTLE	连续时间线性均衡器：提升高频、压低低频的模拟滤波器
DFE	判决反馈均衡器：根据已判决的符号减去其残余拖尾

术语	通俗解释
CDR	时钟数据恢复：接收端从数据流中提取采样时钟的环路
COM	IEEE 802.3 定义的通道运行裕量（Channel Operating Margin，dB）——协议判定通道是否合格的核心指标
VEO	目标误码率处的垂直眼开口（mV）
SNDR	信号与（噪声+失真）之比（dB）
FEXT / NEXT	远端 / 近端串扰：相邻通道的信号耦合到受害通道
ICN	综合串扰噪声——把串扰折算成等效噪声有效值
BER	误码率：传错的比特占总比特的比例（如 1e-12）
TDECQ	802.3 对 PAM4 光发射机的眼闭合度指标（dB），由规范参考接收机测得
ER（消光比）	光信号"1"电平与"0"电平的光功率之比（dB）
OMA	光调制幅度：光"1"与"0"电平的功率差
RIN	激光器相对强度噪声（dB/Hz）
TDR	时域反射计：从 S 参数换算沿传输方向的阻抗分布曲线