

数字通信系统测试工具-任意波形发生器

概述

在无线通信领域，通信信号的发展方向是数字化。这一趋势主要是因为与模拟信号相比，数字信号有很好的频谱效率。为了满足日益苛刻的对信号中心频率、谱密度和频谱宽度的用户需求，对通信设备的要求越来越复杂和苛刻。

现在，任意波形发生器(Arbitrary Waveform Generators，简称 AWG)和函数发生器(Function Generators，简称 FG)可以克服以上困难，提供从未有过的灵活性，为工程师提供一台可产生多种类型信号和支持调制功能的强有力的仪器，可用于测试不同阶段的发射链路和接收链路，例如调制器、解调器、混频器、滤波器、放大器和低噪音放大器（LNA）。

发射链路和接收链路的不同阶段需要不同类型的测试信号，下面列举一些 AWG 应用案例：

- 利用 AWG 输出的比特流和触发输出信号（用于同步）对编码器进行测试。
- 利用 AWG 单路通道或两路通道输出的正交基带信号（可变参数，例如码元数量、发射端滤波器、噪声电平）测试发射/接收码元。
- 利用 AWG 输出的 IF/RF 信号测试混频器、IF 滤波器、发射放大器和接收器状态。

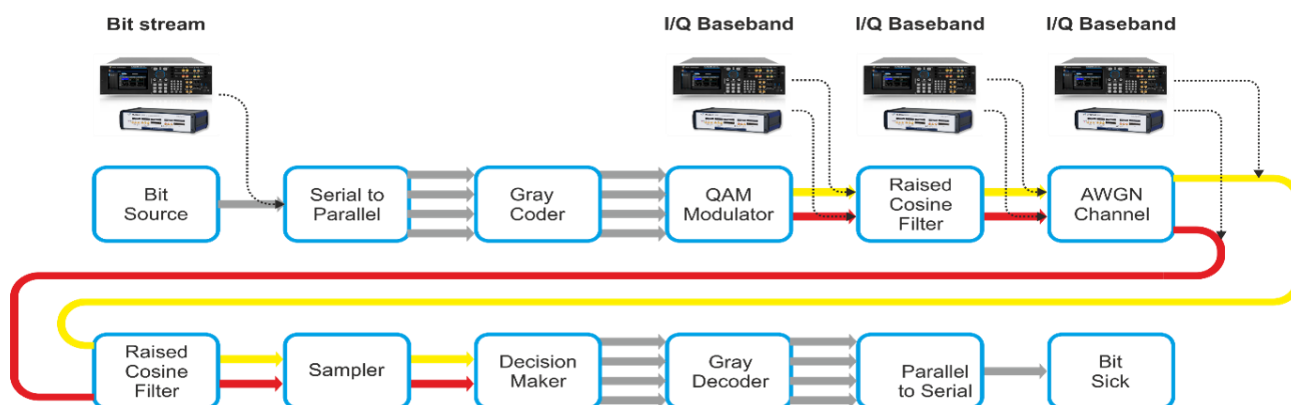


图 1 AWG 在基带发射和接收链路不同阶段的应用

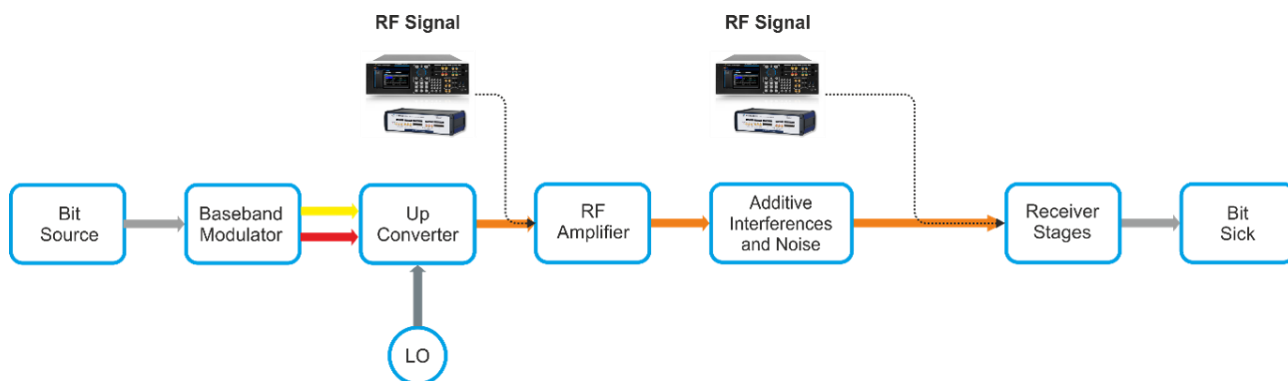


图 2 AWG 在射频发射链路中的应用

AWG 输出比特流

现今，串行协议非常普遍，在很多通信标准中都有应用，因为串行协议具有远距离传输、高抗干扰性和其他的优点。

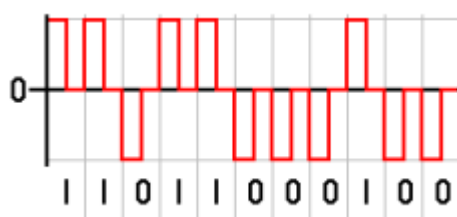


图 3 基带归零码

这种包含比特流的通信类型，发射系统会比较并转换比特流为码元。

使用 AWG 可以创建输出一组参数可设置的比特流，例如频率、幅度和比特流码型等。

市面上大多数的 AWG 都能满足参数可调的要求，下面以某意大利品牌的 Active Technologies AWG-4022 (或 AWG-GS 2500) 为例，介绍在 AWG 中比特流的创建。

创建比特流

可以加载比特流码型到 AWG 的内存中，设置仪器以精确的顺序或者外部输入时钟重建比特“0”或比特“1”。

举例介绍使用多定序器功能创建比特流的方法。通道 1 用于创建比特流码型，比如归零码和在每比特标记输出的脉冲。通道 2 用于创建触发通道 1 的不归零码。在这种方法中，码元码型和比特流码型是不耦合的。

通道 1 的定序器中包含比特流码型，比特“1”（ waveform “Bit1”）和比特“0”（ waveform “Bit0”）。 “Bit1” 和 “Bit0” 项目可设置为无限重复输出，或在事件触发中设置跳转到其他项目波形：触发上升沿发生时，定序器从比特“0” 跳转到比特“1”。

通道 2 的定序器中包含我们想重建的比特流码型，直流电平被称为“ZERO” 对应 0V，代表比特“0”；“ONE” 对应 300mV，代表比特“1”。也可以通过加载包含比特流数据的外部文件来创建比特流。

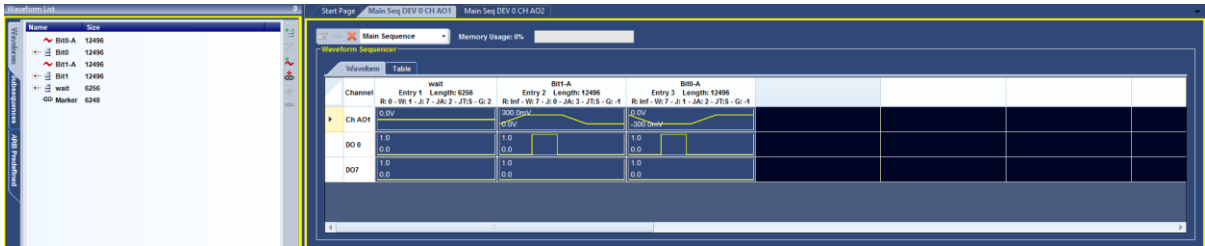


图 4 通道 1 的定序器

创建比特流，必须要考虑 AWG 在触发输入后会花费 1.81us 的时间才响应，所以为了避免发生错误应该将比特流最小周期设置为大于 2us（500Kbps）。通道 2 的定序器中的前两个项目时延时和脉冲：延时将通道 2 置于等待状态，并为开启通道 1 提供足够的时间；脉冲为通道 1 提供触发信号。通道 1 的定序器中的第一个项目是直流 0V，用于“等待”，在通道 2 的脉冲上升沿之后重建通道 1 比特流码型。通道 1 的第一个波形（直流 0V）和脉冲波形之间持续时间的不同提供了充足的延时时间确保了在直流 0V 波形结束前脉冲边沿能够重建。这种延时对策，脉冲和等待状态确保了通道间的同步。

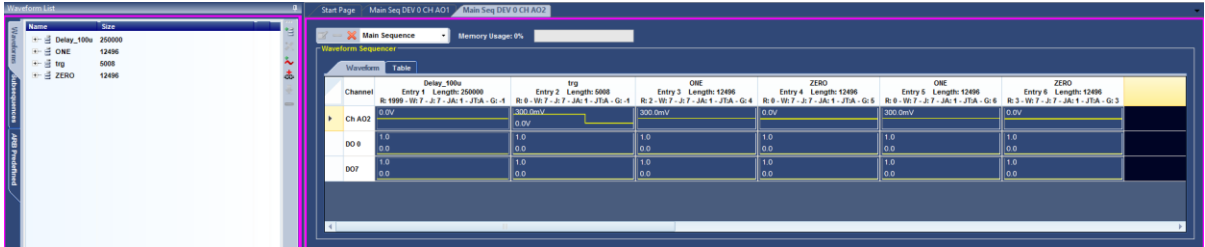


图 5 通道 2 的定序器

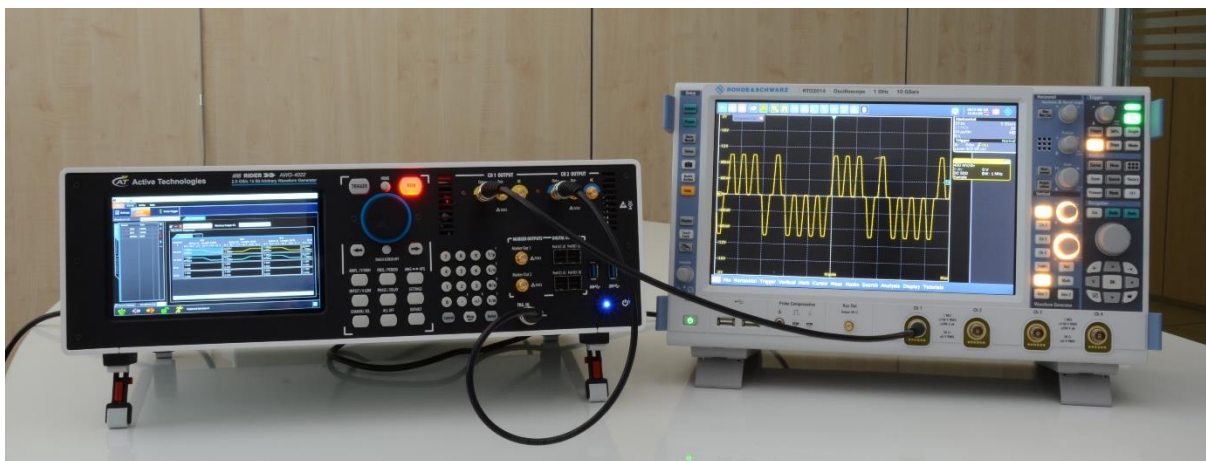


图 6 测量设置：AWG-4022 和 R&S RTO2014 示波器

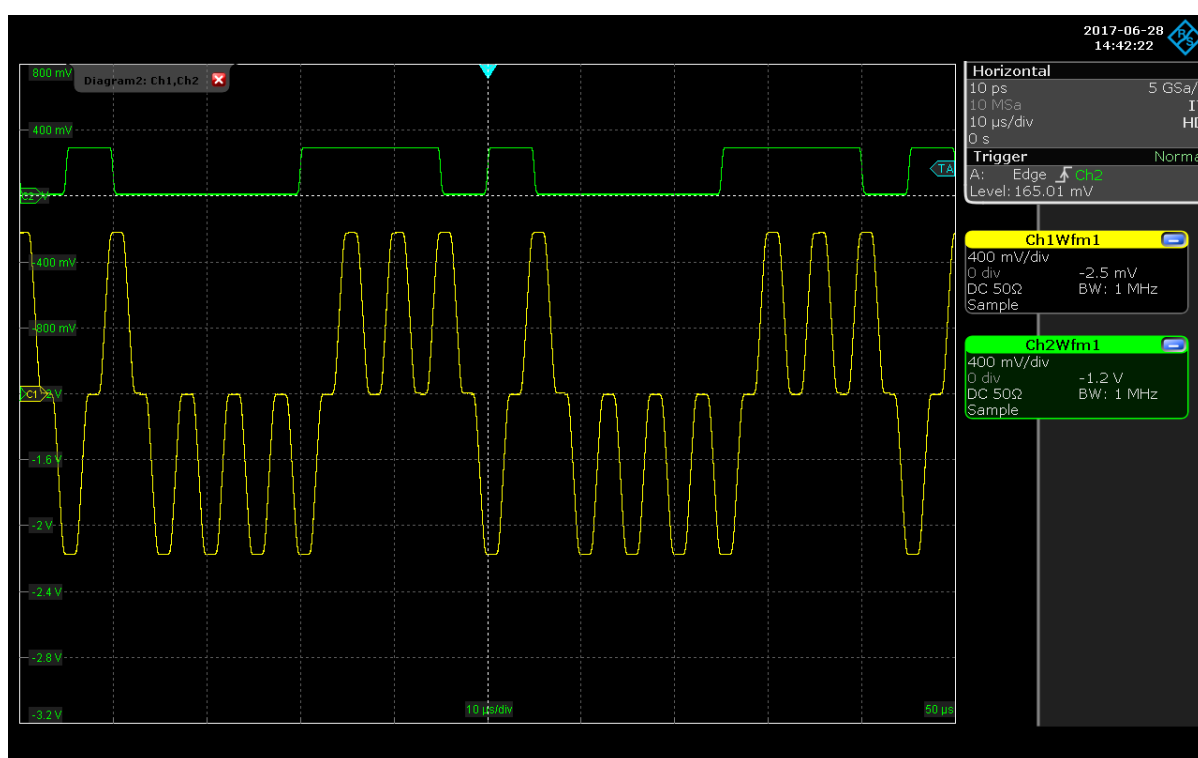


图 7 C1(黄色)：归零码比特流；C2(绿色)：非归零码比特流，用于触发 AWG 的通道 1。使用 R&S RTO2014 示波器捕获信号。

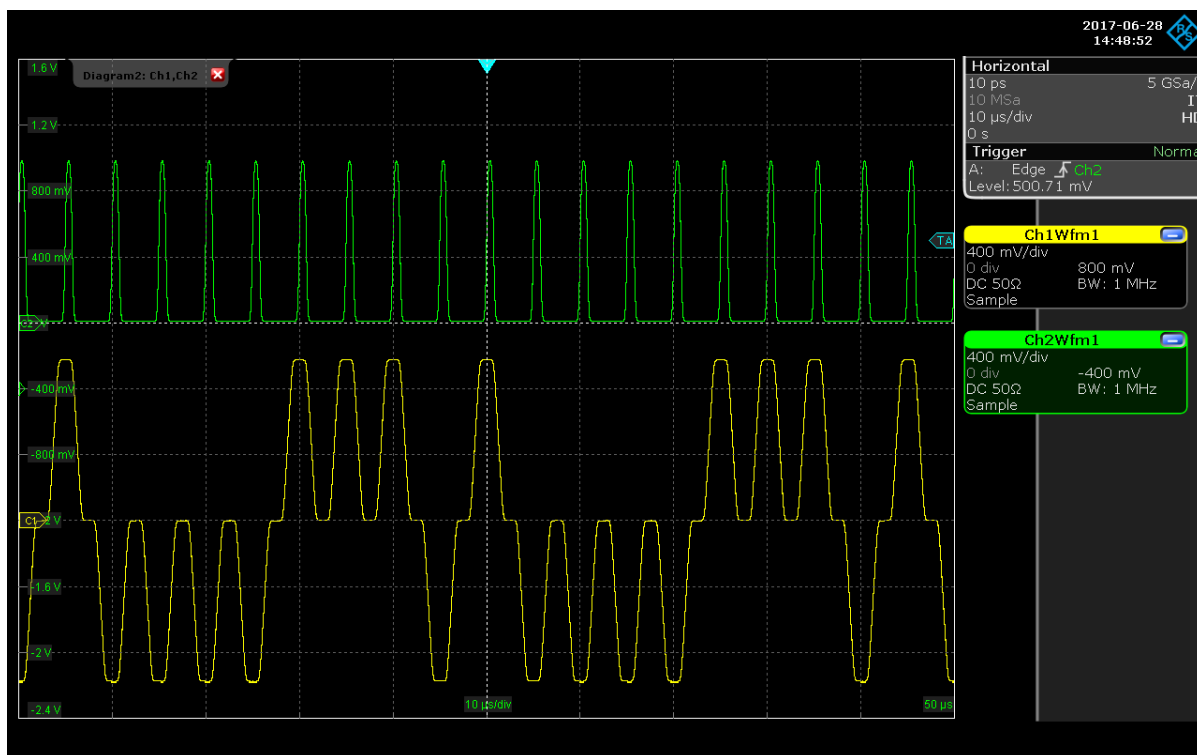


图 8 C1(黄色)：归零码比特流；C2(绿色)：标记输出信号，每比特对应一个脉冲。使用 R&S RTO2014 示波器捕获信号。

AWG 输出 I-Q 信号

在现代数字通信中，基带信号通常包含被调制后合成的两路数字信号，一路叫做 I（同相），另一路叫做 Q（正交）。正因为如此，重建此类信号 AWG 必须具有两路同步通道。

尽管现代通信以数字技术为基础，但输出信号是模拟信号，这样会导致一些典型问题：设备噪声会降低最大 SNR、非线性、正交错误、I 和 Q 通道的不平衡，这些都会导致码元的星座图畸形、理论性能下降。

使用第三方软件，例如 NI Labview® 或 Matlab/Simulink®，可以创建不同类型的基带信号（可以附加上面提及的信号缺陷），并加载最终波形到仪器内存。利用这种方法可以创建和存储很多种调制方案，在测试时调用这些调制方案评估系统性能。

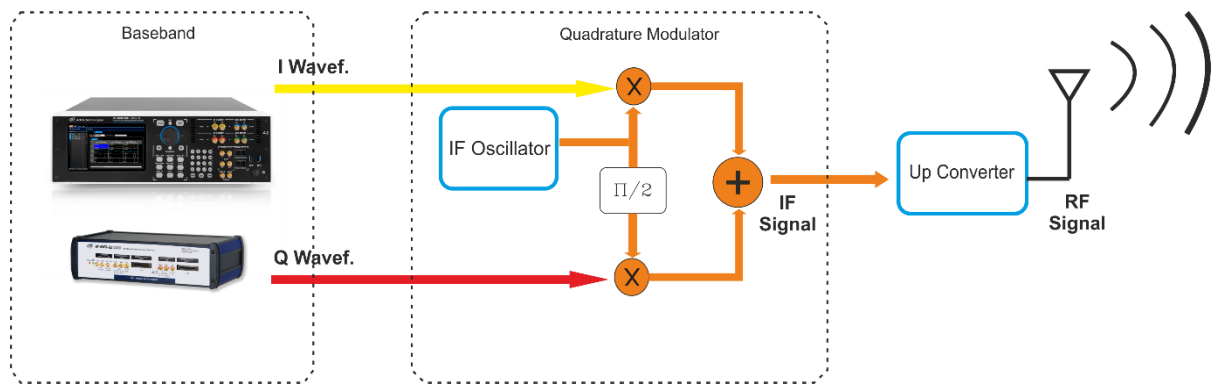


图 9 使用 AWG 为 I-Q 调制器提供基带信号原理框图

某意大利品牌 Active Technologies 的 AWG-GS 2500 提供 2 路模拟输出通道，2 路标记输出通道，最多 32 路数字输出通道（与模拟输出通道同步）：若使用混合波形，则可以在与模拟波形同步的数字码型中上标记一个发送给被测设备的事件。

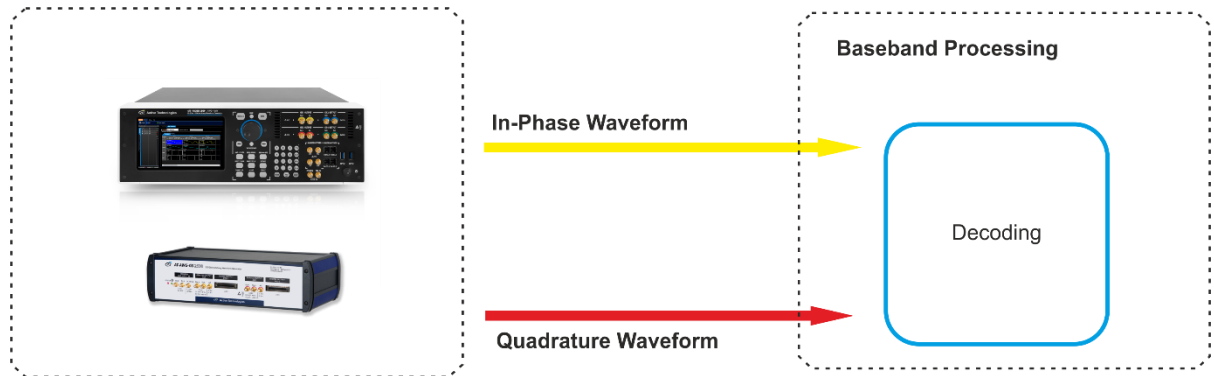


图 10 使用 AWG 为解码器提供 I/Q 基带信号原理框图

使用 Simulink 工具箱创建 I-Q 信号

下面的 Simulink®例程被用于在发射和接收链路的不同位置提供信号。下面讲解一些实际应用：

整形滤波器的改进：在发射和接收端的整形滤波器用于限制带宽以满足频域要求，可以避免码元间干扰（ISI）。最常用的滤波器是升余弦滤波器（通常是平方根模式）和高斯滤波器。在滤波之前进行数字调制，改变设置参数或调制类型可以测试滤波器的动作。

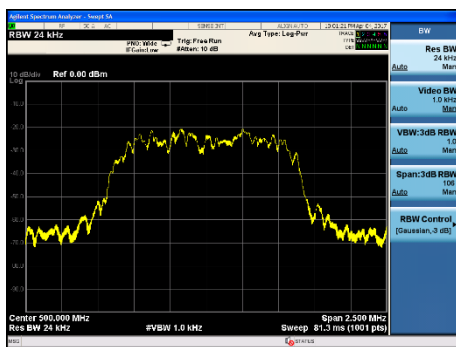


图 11 升余弦滤波器的轮廓

升压转换器测试：通常基带信号被两个混频器调制，基带信号被本振信号相乘。为了测试这些电路，必须在滤波器之后提供 I 和 Q 信号。

基带接收链路测试：一旦信号以基带形式返回，一些电子电路就会解调信号。为了测试解调电路的响应，需要提供不同 SNR 或码元速率的已调制基带信号

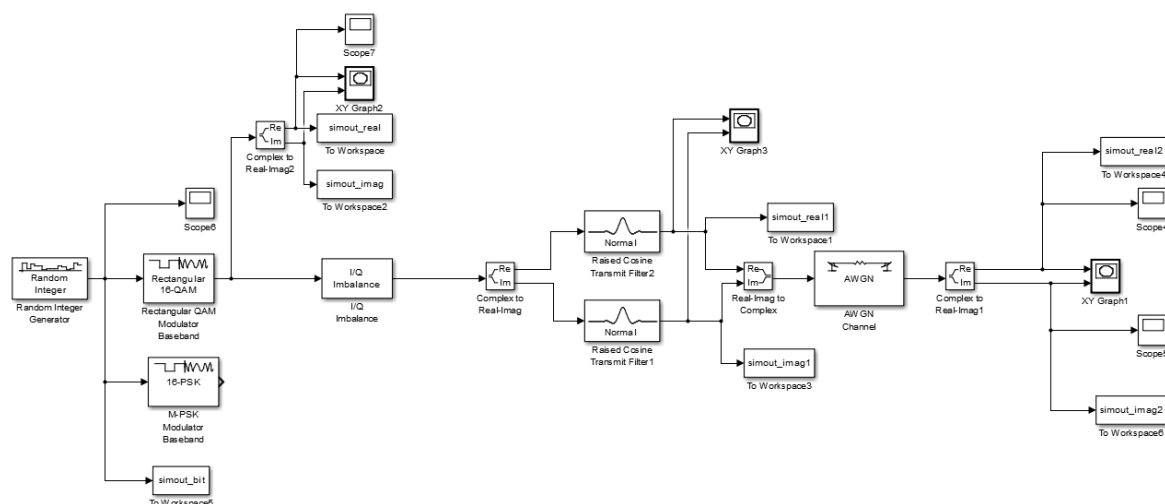


图 12 使用 Simulink®仿真基带信号原理图

1：随机码。

2 (I) , 2 (Q)：16-QAM 直接输出（在整形滤波器之前）。

3 (I) , 3 (Q)：衰减和升余弦整形滤波器之后的 16-QAM 信号。

4 (I) , 4 (Q)：AWGN 通道后的 16-QAM 信号。

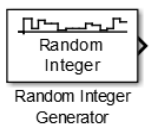
Simulink®提供一些程序库模块，将模块简单地连接组合后设置响应的参数就可以模拟一些系统了。

在本文档中，我们模拟 I-Q 基带信号生成系统，增加发射滤波器、衰减器和 AWGN 通道噪声。

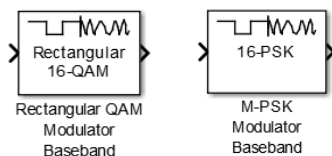
最后，仿真结果被输出到 Matlab®工作空间，使用 SCPI 命令控制仪器将仿真劫夺以脚本形式加载到仪器内存。

主要的 Simulink®模块有：

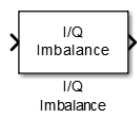
- **Random number generator**：生成伪随机数据流，馈送至系统。



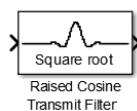
- **M-QAM/M-PSK modulator**：调制输入的复数数据流，实部代表 I 信号，虚部代表 Q 信号。



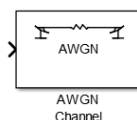
- **I/Q imbalance**：在 I-Q 调制信号中添加失衡因子，仿真真实电子电路的缺陷。



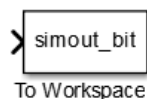
- **Raised cosine filter**：这是一种非常常用的滤波器，用于整形避免码间干扰。



- **AWGN Channel**：添加噪声（或者使用其他模块进行衰减），仿真在真实欢迎传播后抵达接收端的信号。



- **To Workspace**：采集信号并在 Matlab®工作空间创建数组，用于二次处理信号或向 AWG 内存加载信号样本点。



建议将所有的 “To Workspace” 模块的采样时间设置为等于 AWG 的采样周期。在上例中，设置为 400ps (2.5GS/s)。这样设置后，信号样本数组就可以可以直接兼容 AWG 结构。AWG 结构要求样本数量为 16 的倍数。

$$\text{仿真时间[s]} = (\text{样本数量} * \text{采样周期[s]}) - \text{采样周期[s]}$$

但是并不是所有的 Simulink®模块都支持十进制采样周期时间，所以设置采样周期时间为 1，将 “仿真时间” 设置为与欲加载到 AWG 内存中的样本数相等。

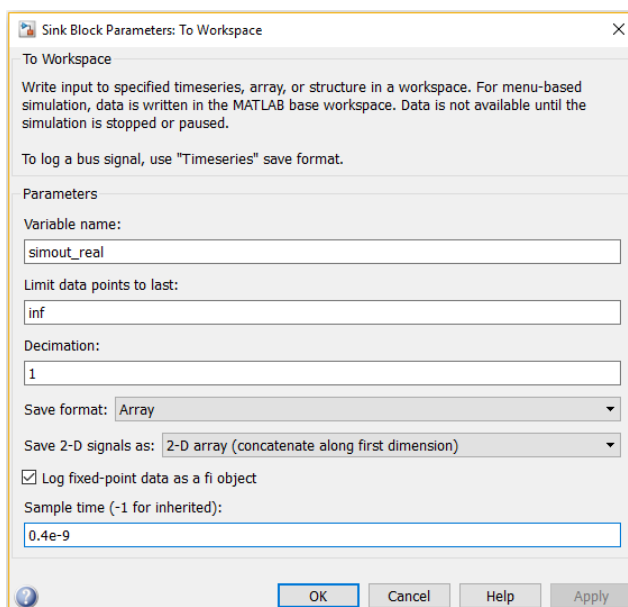


图 13 “To Workspace” Simulink®模块的设置页面

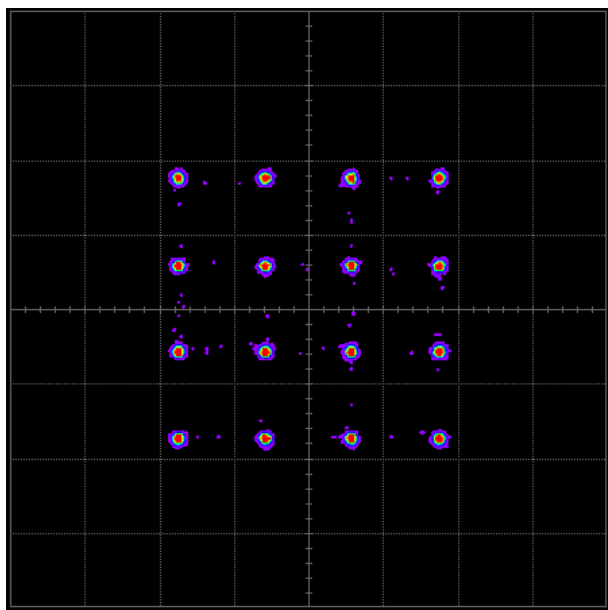


图 14 滤波前的矩形 16-QAM

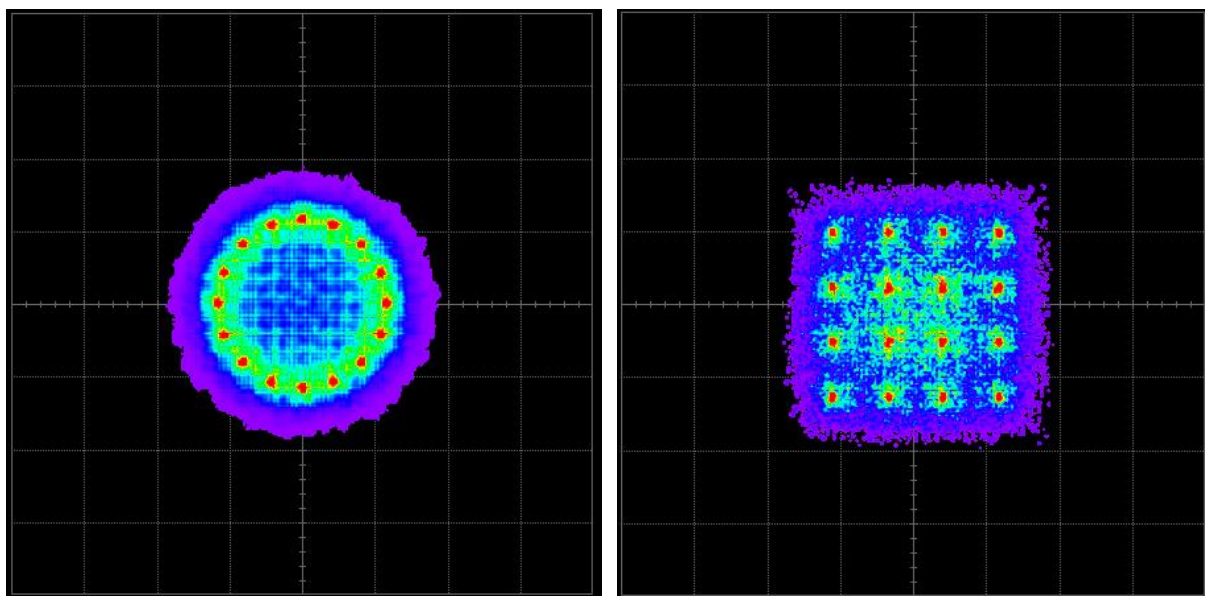


图 15 16-PSK 和 16-QAM 的星座图

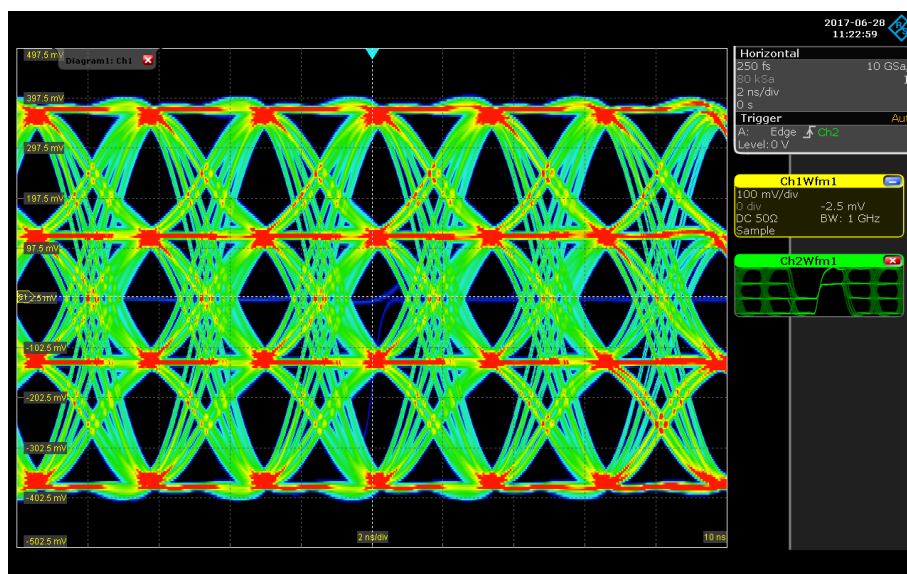


图 16 16-QAM 的 I 通道眼图，使用 R&S RTO2014 示波器捕获信号

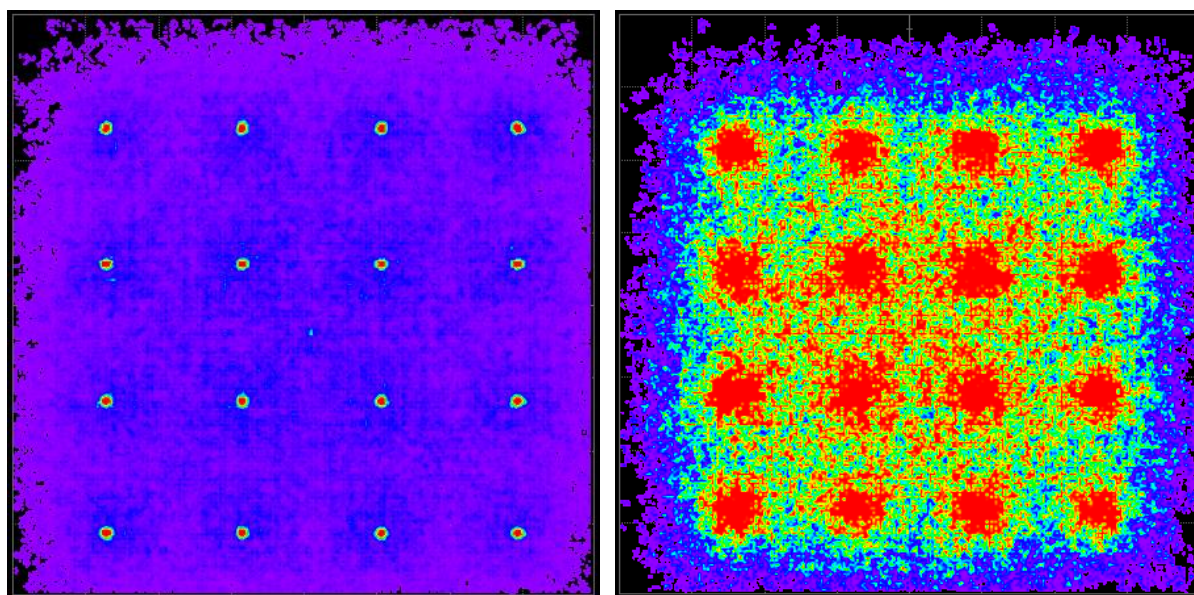


图 17 50dB 和 20dB 之间的 SNR 对比图

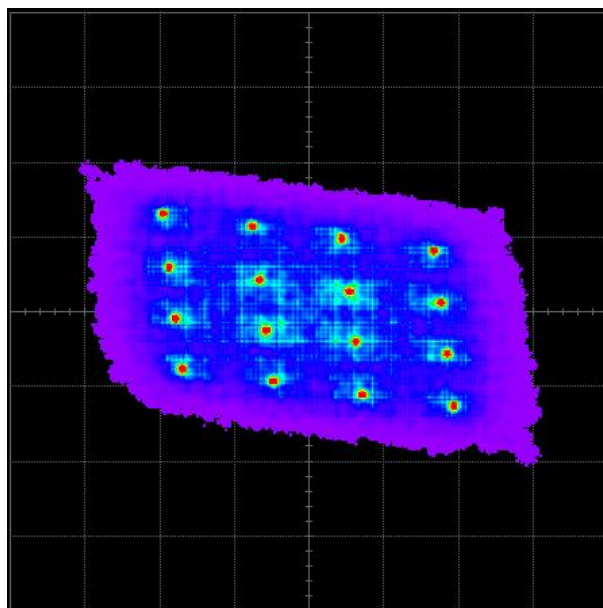


图 18 在 I 通道和 Q 通道间的损耗图

AWG 输出 IF/RF 信号

I-Q 信号可以通过使用可能增加不必要失真的外部调制器进行合成，此外，在更改分析调制方案的情况下，应更换调制器。

通过 AWG 可直接合成 IF/RF 信号，并可以克服上述问题。

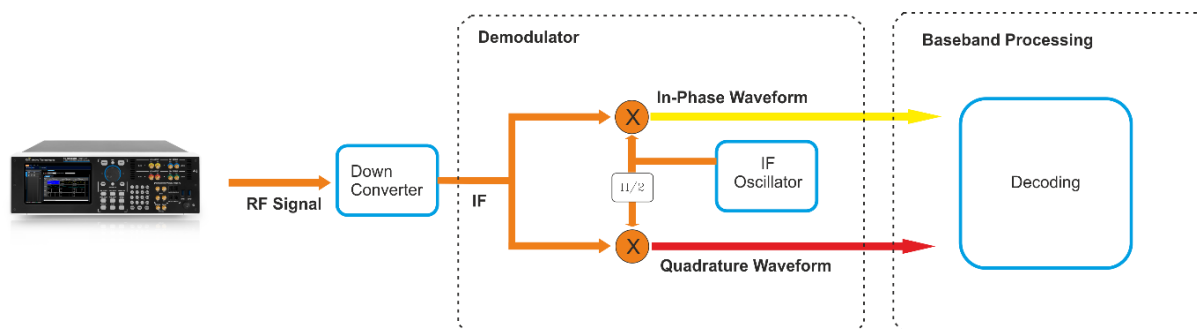


图 19 AWG 生成 RF 信号（接收机测试）

使用例如 NI Labview®或 Matlab/Simulink®这样的软件，可以直接创建 RF/IF 调制信号，并向信号添加缺陷，最后将结果加载到 AWG 内存中。

为确保良好的信号频谱质量，需要 4 倍以上的过采样。例字中的 AWG-4022 和 AWG-SG2500 可以生成最高 600MHz 的 RF 调制信号；对于较低频率信号，过采样速率增加可提升信号质量。下一 AWG 系列将克服 600MHz 的限制，为许多 RF 应用开辟道路。

使用 Simulink 工具箱生成 RF 信号

利用所描述的 Simulink 模块可以生成用于不同传输阶段和接收机链路的调制信号：

- **发射机 RF 放大器测试**：在 I-Q 调制中，RF 放大器的线性度非常重要，因为非线性会引发诸如 AM/AM 和 AM/PM 转换之类的不必要调制。通常使用提供正弦波的 VNA 来测量 RF 放大器性能并分析响应。相反，AWG 可以将调制的 RF 信号直接提供给放大器，具有在实际操作条件中进行测试的优点。最终结果取决于设备的工作点和热效应，然后用正弦波进行测试可能会与放大器工作实际情况不同的结果。

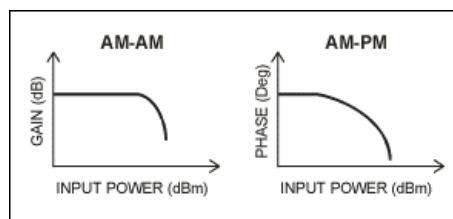


图 20 RF 功率放大器的 AM/AM 和 AM/PM 图

- **接收机 RF 部分测试**：RF 部分主要由滤波器、低噪声放大器（LNA）、混频器和载波恢复电路组成；这部分仅传输需要有用的信号。在这个 Simulink 示例中，我们添加了两个干扰信号在载波的不同位置点处，以测试接收机性能。
- **接收机链路测试**：RF 调制信号可用于测试整个接收机链路，提供不同损耗的调制信号并观察接收机的性能。
- **均衡器测试**：现代接收机可以在多个天线之间切换信号功率或合成多个信号以获得最佳信号。AWG 通道可以加载相同的 RF 信号，但可具有不同的幅度或相位；以这种方式可以测试均衡器性能。对于这种测试，AWG 的定序器可能是有用的，因为它允许创建不同振幅、相位或频率得调制信号的波形序列。

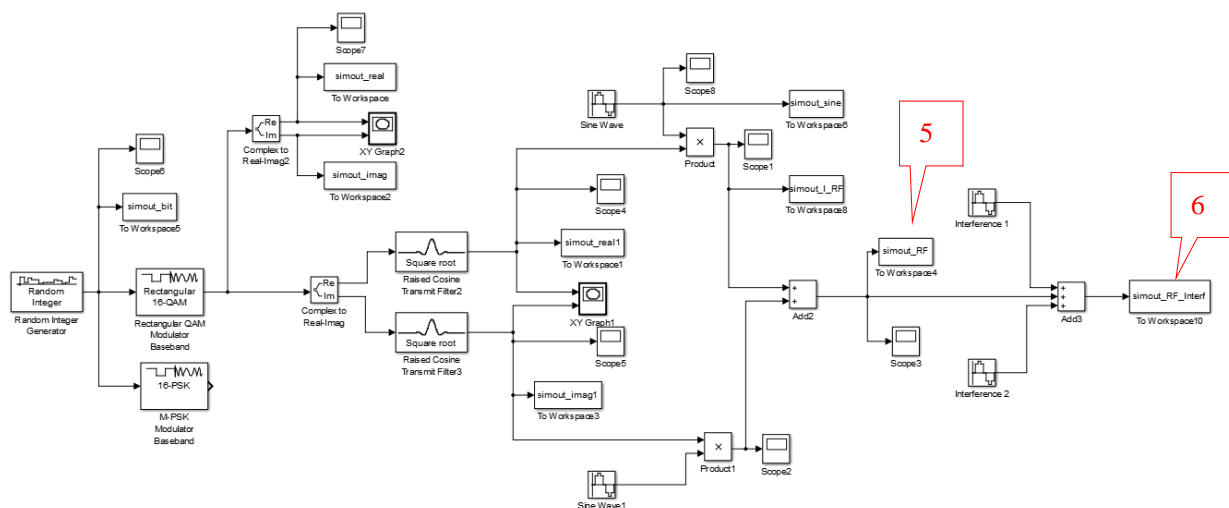


图 21 RF 发生器 Simulink 框架

5：16-QAM 的 RF 输出。

6：输入 2 个干扰信号后 16-QAM 的 RF 输出。

该 Simulink 框架是前文的一个扩展：在基带部分之后，我们添加两个混频器和两个正弦本地振荡器。更多的是在生成 RF 部分之后，我们添加了另外两个正弦载波附近的干扰信号。

在这个 Simulink 框架中添加的主要模块有：

- **Sine Wave**：本地振荡器和干扰信号模块。



- **Product**：理想混频器模块。



- **Add**：允许多个信号间进行加或减。



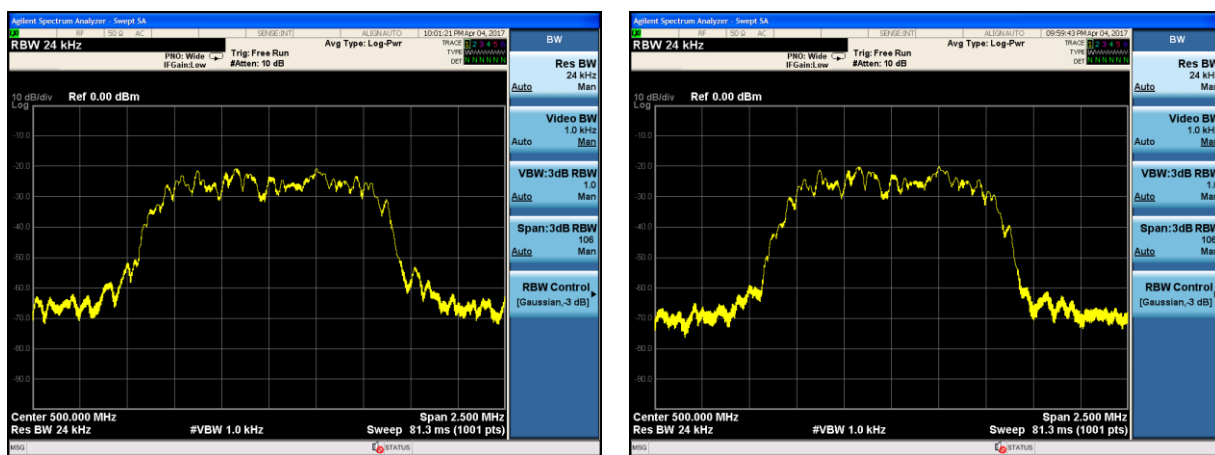


图 22 升余弦滤波器在正常情况和均方根中的对比图

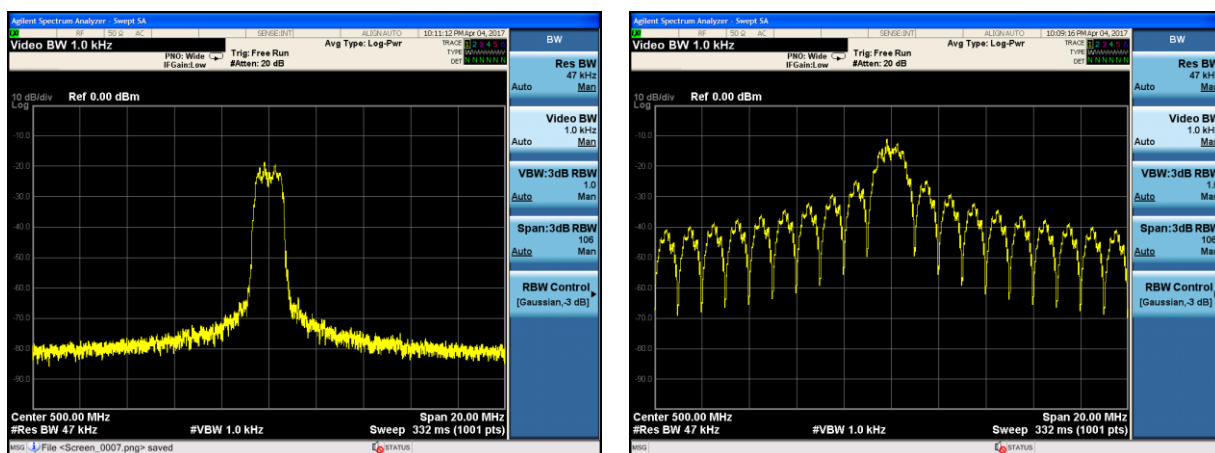


图 23 带有和不带有升余弦滤波器条件下的 16-QAM 频谱对比图

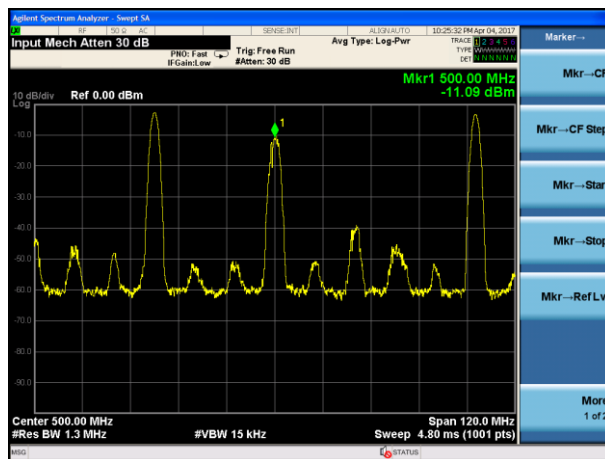


图 24 载波在 500MHz，其它两个干扰信号分别位于 470MHz 和 550MHz

附录

在本章中，我们描述了简化信号生成的一些特点。在小节中我们会提及控制仪器加载波形的 Matlab 脚本、在定序器中保存波形的方法和简化重复操作。

Matlab 脚本

下面提供的 Matlab®脚本实现了使用 NI VISA®通过以太网发送 SCPI 命令。对于 NI VISA 的详细介绍和如何连接仪器，请参考 AWG 的编程手册。

列举的历程支持加载波形样本至仪器内存并以连续模式生成波形。

可以通过修改和扩展脚本控制 AWG 的所有功能。

图 25 Matlab 脚本截图：向 AWG 内存加载样本点

定序器

使用高采样率唯一的缺陷就是仪器内存的消耗，然后为了节省内存，可以降低采样率，但信号质量也随之降低。

为了解决存储器占用和信号质量的并存问题，重要的是要考虑使用定序器来创建构成在存储器中存储的不同波形的信号，从而可以使用外部触发器上的循环，跳转和分支等指令来选择不同的实时波形。

如果一个复杂的波形可以分解为几个部分，定序器就为了节省仪器内存仅存储不同的部分，并在运行时间内组合它们创建信号。例如，长序列的归零（RZ）码仅由两个码元组成：

“0”和“1”，然后存储和组合这两个符号，可以创建任何数据流。

AT-AWG-GS 应用程序具有内置编辑器，可以以简单的方式创建非常复杂的波形，此外，

您可以导入由第三方工具创建的波形或者以 CSV，TXT 格式导出。

所有这些波形都可以轻松的插入到定序器中，构建非常复杂的波形序列。

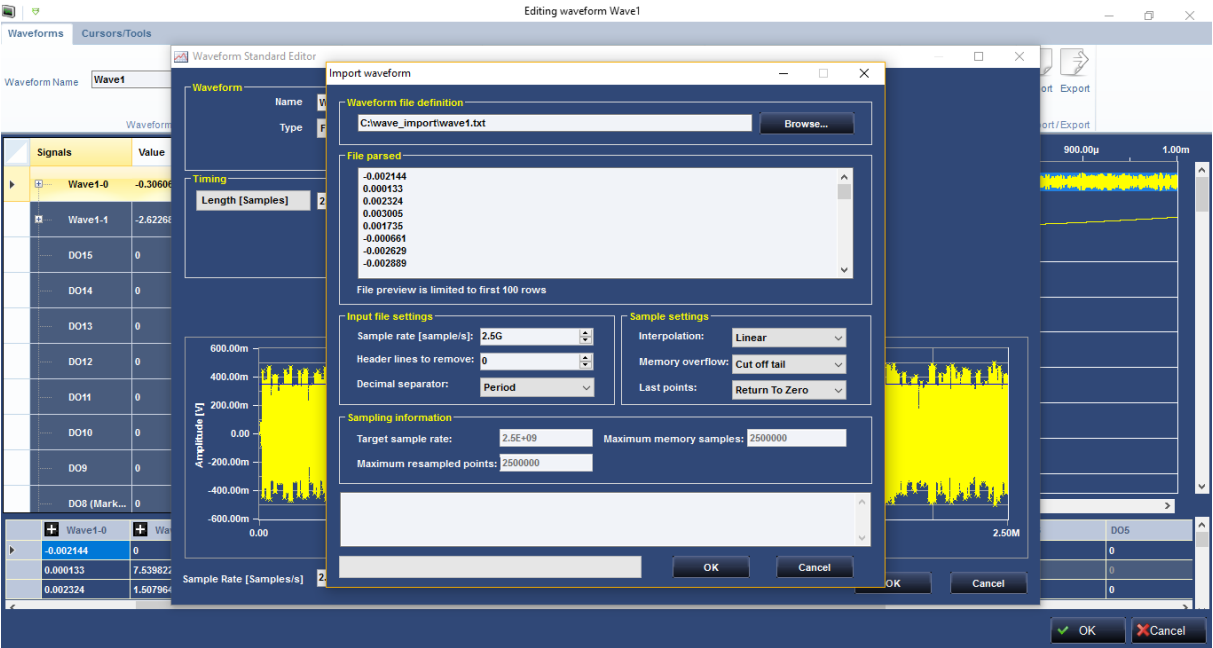


图 26 AWG 软件“导入波形”界面

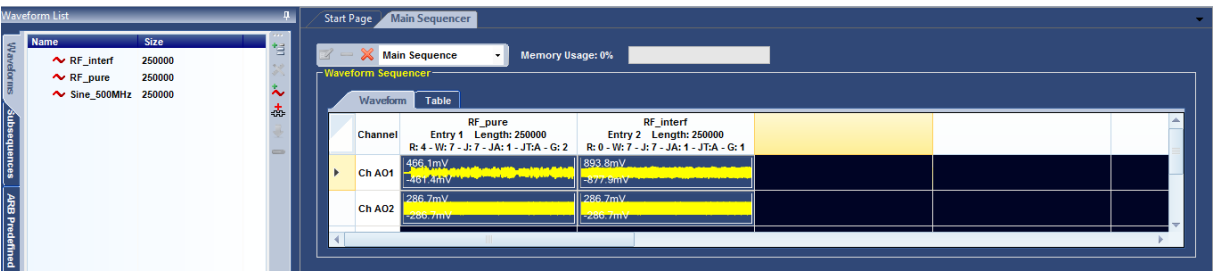


图 27AWG 定序器界面

题外话

在以上应用中，业内同行都说某意大利品牌 Active Technologie 的 ARB 骑士系列任意波形比较好用。ARB 骑士系列 AWG 提供优质的信号完整性，简单的触摸显示屏操作 (SimpleRider™)。复杂信号的生成只需要简单的几下触摸设置。输出电压幅度最高 5Vpp@50Ω 负载，模拟带宽 1GHz，边沿时间小于 350ps。

ARB
RIDER 
4000 Series

