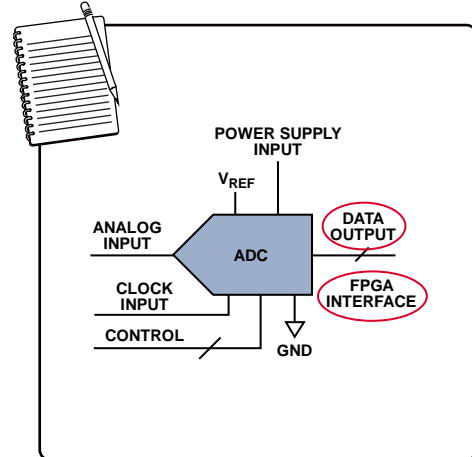


## FPGA与ADC 数字数据输出的接口

ADI公司应用工程部

### 引言

现场可编程门阵列(FPGA)与模数转换器(ADC)输出的接口是一项常见的工程设计挑战。本笔记简要介绍各种接口协议和标准，并提供有关在高速数据转换器实现方案中使用LVDS的应用诀窍和技巧。



应用工程笔记教程系列

### 目录

接口方式和标准.....	2
一般建议.....	3
典型示例.....	4
故障排除技巧.....	7
ADC丢失第14位.....	7
ADC丢失第14位时的频域曲线.....	7
ADC丢失第14位时的时域曲线.....	8

ADC的第9位和第10位短接在一起.....	8
第9位和第10位短接在一起时的ADC频域曲线.....	9
第9位和第10位短接在一起时的ADC时域曲线.....	9
数据和时钟时序无效时的时域曲线.....	10
数据和时钟时序无效时的放大时域曲线.....	10

### 修订历史

#### 2013年1月—修订版0至修订版A

删除“使用适配板”部分..... 11

#### 2012年1月—修订版0：初始版

## 接口方式和标准

现场可编程门阵列(FPGA)与模数转换器(ADC)数字数据输出的接口是一项常见的工程设计挑战。此外, ADC使用多种多样的数字数据样式和标准, 使这项挑战更加复杂。对于通常在200 MHz以下的低速数据接口, 单倍数据速率(SDR) CMOS非常普遍: 发送器在一个时钟沿传送数据, 接收器在另一个时钟沿接收数据。这种方式可确保数据有充足的时间完成建立, 然后由接收器采样。在双倍数据速率(DDR) CMOS中, 发送器在每一个时钟沿都会传送数据。因此, 在相同的时间内, 它传输的数据量是SDR的两倍。然而, 接收器正确采样的时序更加复杂。

并行低压差分信号(LVDS)是高速数据转换器的常见标准。它采用差分信号, 每一位均有P线和N线; 在最新的FPGA中, 其速度可达DDR 1.6 Gbps或800 MHz。并行LVDS的功耗低于CMOS, 但所需的线数则是CMOS的两倍, 因而布线可能比较困难。LVDS常常用在具有“源同步”时钟系统的数据转换器中, 不过这并不是LVDS标准的一部分。在这种设置中, 时钟与数据同相, 并且与数据一同发送。这样, 接收器就能使用该时钟更轻松地捕捉数据, 因为它现在知道数据传输何时发生。

FPGA逻辑的速度一般跟不上高速转换器的总线速度, 因此大多数FPGA具有串行器/解串器(SERDES)模块, 用以将转换器端的快速、窄带串行接口转换为FPGA端的慢速、宽带并行接口。针对总线中的每个数据位, 此模块输出2、4或8位, 但以 $\frac{1}{2}$ 、 $\frac{1}{4}$ 或 $\frac{1}{8}$ 的时钟速率输出, 从而有效地将数据解串。数据由FPGA内部的宽总线处理, 其速度远低于连接到转换器的窄总线。

LVDS信号标准也用于串行链路, 大部分是用于高速ADC上。当引脚数量比接口速度更重要时, 通常使用串行LVDS。常常使用两个时钟: 数据速率时钟和帧时钟。并行LVDS部分提到的所有考虑同样适用于串行LVDS。并行LVDS不过是由多条串行LVDS线组成。

I<sup>2</sup>C使用两条线: 时钟和数据。它支持总线上的大量器件, 而无需额外的引脚。I<sup>2</sup>C相对较慢, 考虑协议开销, 速度为400 kHz至1 MHz。它通常用在慢速、小尺寸器件上。I<sup>2</sup>C也常常用作控制接口或数据接口。

SPI使用3到4条线:

- 时钟
- 数据输入和数据输出(4线), 或者双向数据输入/数据输出(3线)
- 片选(每个非主机器件使用一条线)

可用片选线有多少, SPI就能支持多少器件。它的速度可达约100 MHz, 通常用作控制接口和数据接口。

串行PORT (SPORT)是一种基于CMOS的双向接口, 每个方向使用一个或两个数据引脚。对于非%8分辨率, 其可调字长能够提高效率。SPORT支持时域复用(TDM), 通常用在音频/媒体转换器和高通道数转换器上。它提供每引脚约100 MHz的性能。Blackfin处理器支持SPORT, FPGA上可直接实现SPORT。SPORT一般仅用于数据传输, 但也可以插入控制字符。

JESD204是一种JEDEC标准, 用于单一主机(如FPGA或ASIC等)与一个或多个数据转换器之间的高速串行链路。最新规格提供每通道或每差分对最高3.125 Gbps的速度。未来的版本可能提供6.25 Gbps及更高的速度。通道采用8B/10B编码, 因而通道的有效带宽降为理论值的80%。时钟嵌入在数据流中, 因此没有额外的时钟信号。多个通道可以结合在一起以提高吞吐量, 数据链路层协议确保数据完整性。在FPGA/ASIC中, 为实现数据帧传输, JESD204需要的资源远远多于简单的LVDS或CMOS。它显著降低了接线要求, 不过要求使用更昂贵的FPGA, PCB布线也更加复杂。

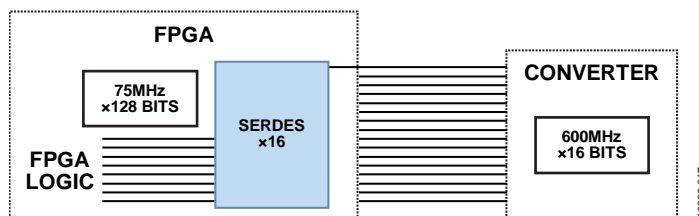


图1. FPGA接口中的SERDES模块和转换器的高速串行接口

## 一般建议

进行ADC与FPGA的接口设计时，下列一般建议会有所帮助。

- 使用接收器、FPGA或ASIC的外部电阻终端，而不要使用FPGA内部终端，以免不匹配引起反射，致使超出时序预算。
- 如果系统使用多个ADC，请勿使用某个ADC的某个DCO。
- 布设连接到接收器的数字走线时，请勿采用大量“转接”（tromboning）来使所有走线保持等长。
- 利用CMOS输出端的串联终端降低边沿速率并限制开关噪声。确认所用的数据格式（二进制补码或偏移二进制）正确。

采用单端CMOS数字信号时，逻辑电平以大约1 V/nS的速度移动，典型输出负载为10 pF（最大值），典型充电电流为10 mA/位。应采用尽可能小的容性负载，使充电电流最小。这可以利用尽可能短的走线仅驱动一个门来实现，最好没有任何过孔。在数字输出端和输入端使用阻尼电阻，也可以使充电电流最小。

阻尼电阻和容性负载的时间常数应为采样速率周期的大约10%。如果时钟速率为100 MHz，负载为10 pF，则该时间常数应为10 nS的10%，即1 nS。这种情况下，R应为100 Ω。为获得最佳信噪比(SNR)性能，1.8 V DRVDD优于3.3 V DRVDD。然而，当驱动大容量负载时，SNR性能会下降。CMOS输出支持最高约200 MHz的采样时钟速率。如果驱动两个输出负载，或者走线长度大于1或2英寸，建议使用缓冲器。

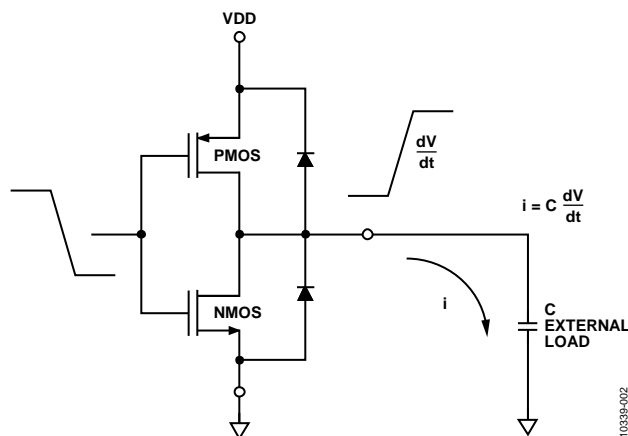


图2. 典型CMOS数字输出驱动器

ADC数字输出应小心对待，因为瞬态电流可能会耦合回模拟输入端，导致ADC的噪声和失真提高。

图2所示的典型CMOS驱动器能够产生很大的瞬态电流，尤其是驱动容性负载时。对于CMOS数据输出ADC，必须采取特别措施以使这些电流最小，不致于在ADC中产生额外的噪声和失真。

### 典型示例

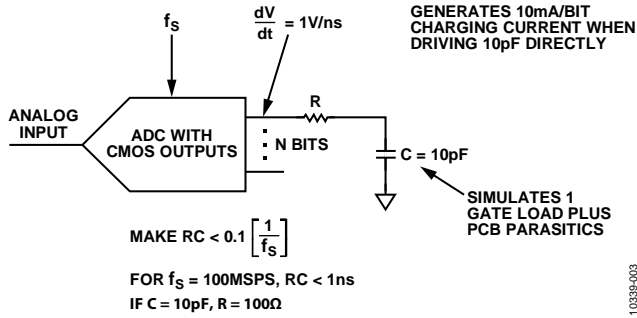


图3. 利用串联电阻使CMOS数字输出的充电电流最小

图3显示了一个16位并行CMOS输出ADC的情况。每路输出有一个10 pF负载，用以模拟一个门负载加上PCB寄生电容；当驱动10 pF负载时，各驱动器产生10 mA的充电电流。

因此，该16位ADC的总瞬态电流可能高达  $16 \times 10 \text{ mA} = 160 \text{ mA}$ 。在各数据输出端增加一个小串联电阻R，可以抑制这些瞬态电流。应适当选择该电阻的值，使RC时间常数小于总采样周期的10%。如果  $f_s = 100 \text{ MSPS}$ ，则RC应小于1 ns。C = 10 pF，因此最佳的R值约为100 Ω。选择更大的R值可能会降低输出数据建立时间性能，并干扰正常的捕捉。CMOS ADC输出端的容性负载应以单个门负载

为限，通常是一个外部数据捕捉寄存器。任何情况下都不得将数据输出端直接连到高噪声数据总线，必须使用一个中间缓冲寄存器，使ADC输出端的直接负载最小。

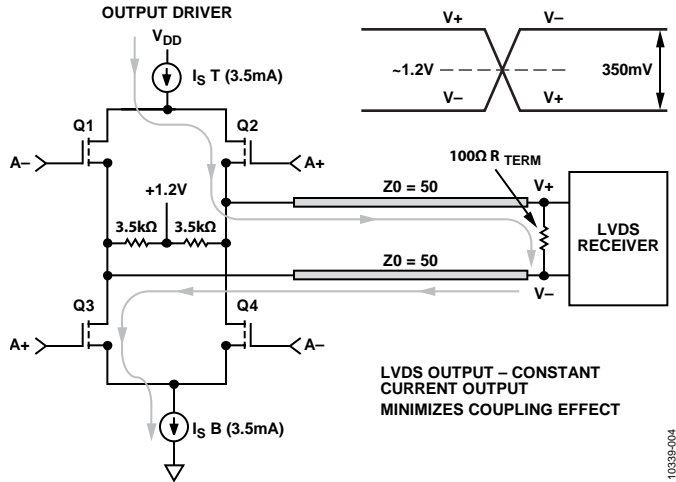


图4. 典型LVDS驱动器设计

图4显示了CMOS中的一个标准LVDS驱动器。标称电流为3.5 mA，共模电压为1.2 V。因此，当驱动一个100 Ω差分终端电阻时，接收器各输入的摆幅为350 mV p-p，这相当于700 mV p-p的差分摆幅。这些数值来源于LVDS规范。

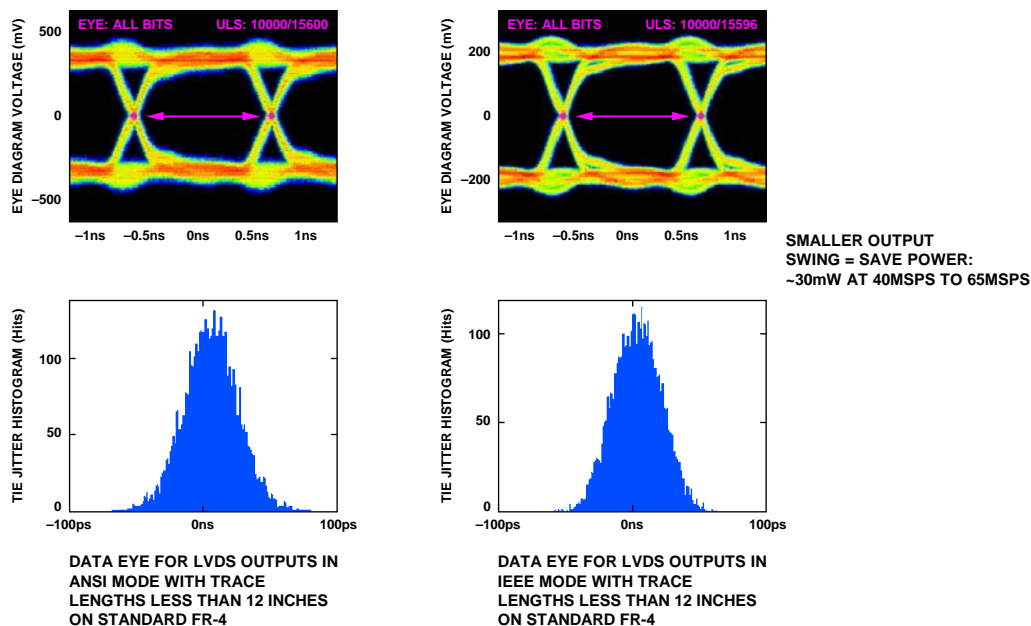


图5. ANSI和IEEE LVDS标准

LVDS标准有两个：一个由ANSI制定，另一个由IEEE制定。虽然这两个标准类似且大致兼容，但并不完全相同。图5比较了这两个标准的眼图和抖动直方图。IEEE标准LVDS的摆幅为200 mV p-p，低于ANSI标准的320 mV p-p，这有助于节省数字输出的功耗。因此，如果IEEE标准支持目标应用及与接收器的连接，建议使用IEEE标准。

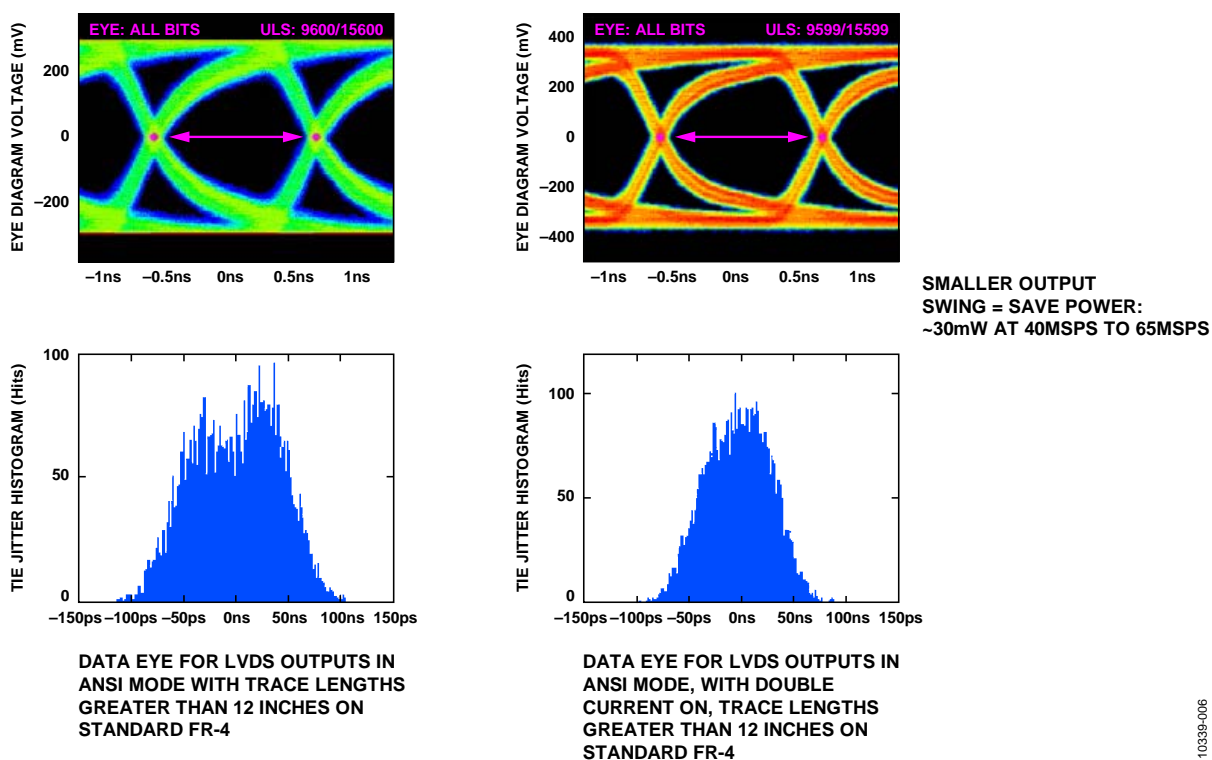


图6. ANSI和IEEE LVDS标准：走线超过12英寸

图6比较了走线长度超过12英寸或30厘米情况下的ANSI和IEEE LVDS标准。两幅图中，驱动电流均采用ANSI版标准。右图中，输出电流加倍，这可以净化眼图并改善抖动直方图。

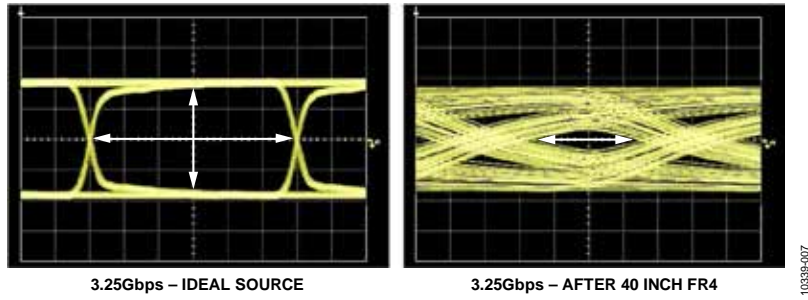


图7. FR4通道损耗的影响

图7显示了长走线对FR4材料的影响。左图显示了发送器端的理想眼图。在距离40英寸的接收器端，眼图几乎闭合，接收器难以恢复数据。

## 故障排除技巧

### ADC丢失第14位

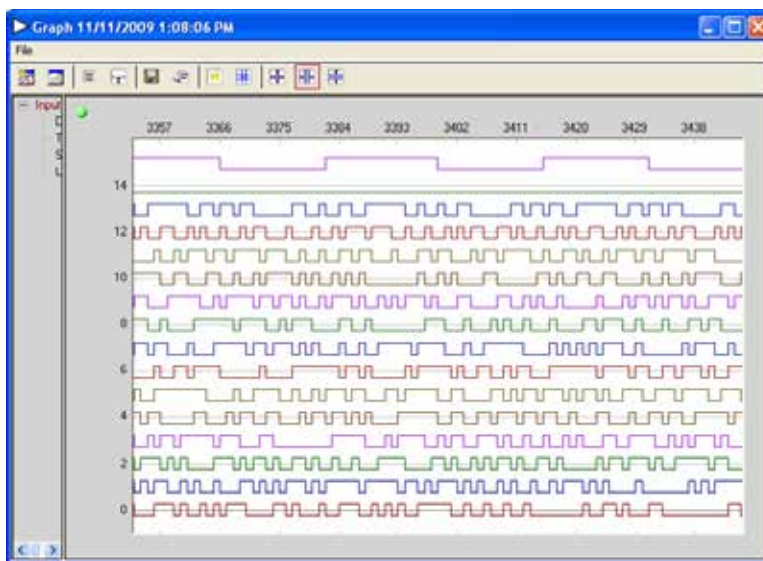


图8. AD9268 ADC丢失第14位

图8中，数据位的VisualAnalog数字显示表明，第14位从未跳变。这可能说明器件、PCB或接收器有问题，或者无符号数据不够大，无法使最高有效位跳变。

### ADC丢失第14位时的频域曲线

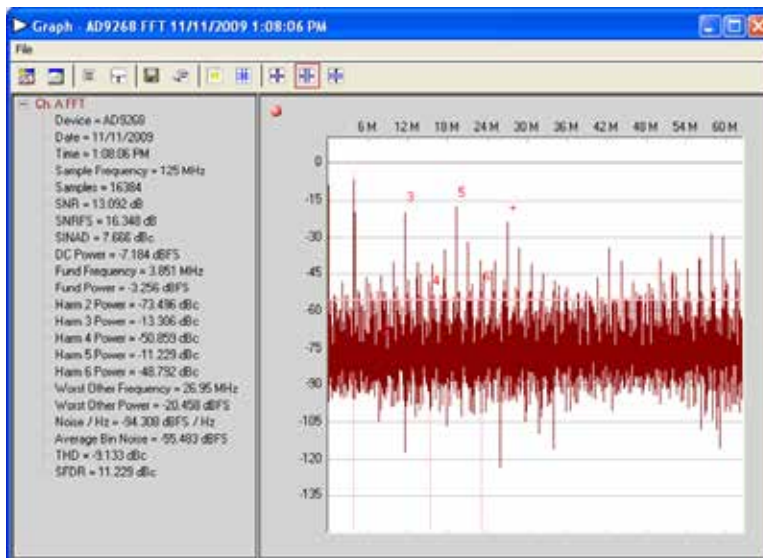


图9. AD9268 ADC丢失第14位时的频域曲线

图9显示了上述数字数据(其中第14位未跳变)的频域视图。该图说明，第14位有意义，系统中的某个地方发生错误。

## ADC丢失第14位时的时域曲线

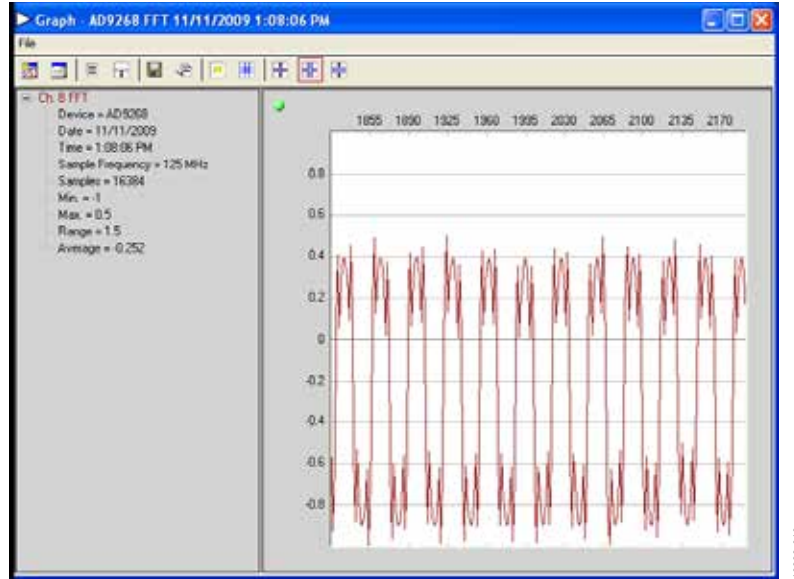


图10. AD9268 ADC丢失第14位时的时域曲线

图10为相同数据的时域曲线。它不是一个平滑的正弦波，数据发生偏移，波形中多个点处有明显的尖峰。

## ADC的第9位和第10位短接在一起

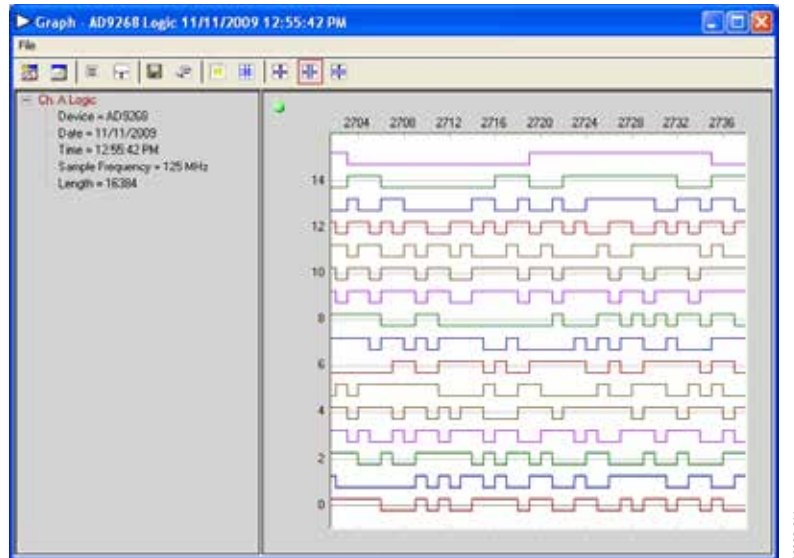


图11. AD9268 ADC的第9位和第10位短接在一起

图11所示不再是丢失一位的情况，而是两位短接在一起，因此对于这两个引脚，接收器始终接收到相同的数据。



### ADC第9位和第10位短接在一起时的频域曲线

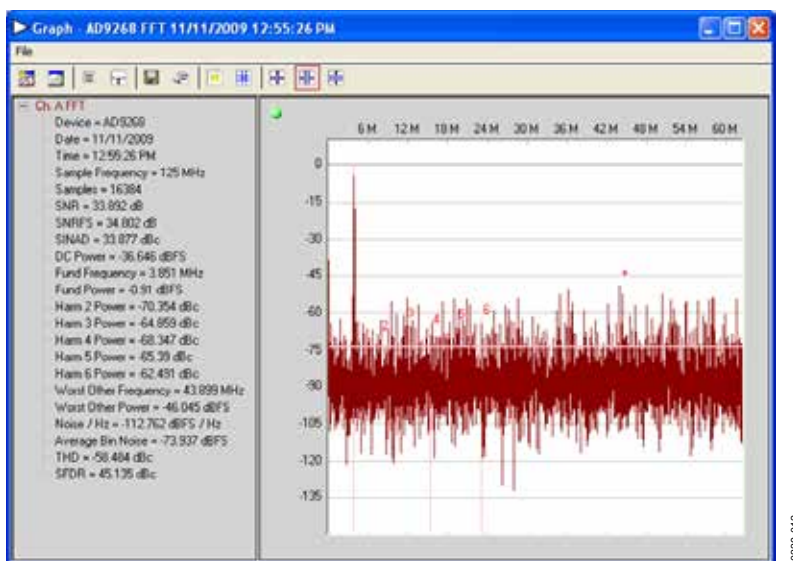


图12. AD9268 ADC的第9位和第10位短接在一起时的频域曲线

图12显示了两位短接在一起时的频域视图。虽然基频音非常清楚，但噪底显著低于预期。噪底失真的程度取决于短接哪两位。

### ADC第9位和第10位短接在一起时的时域曲线

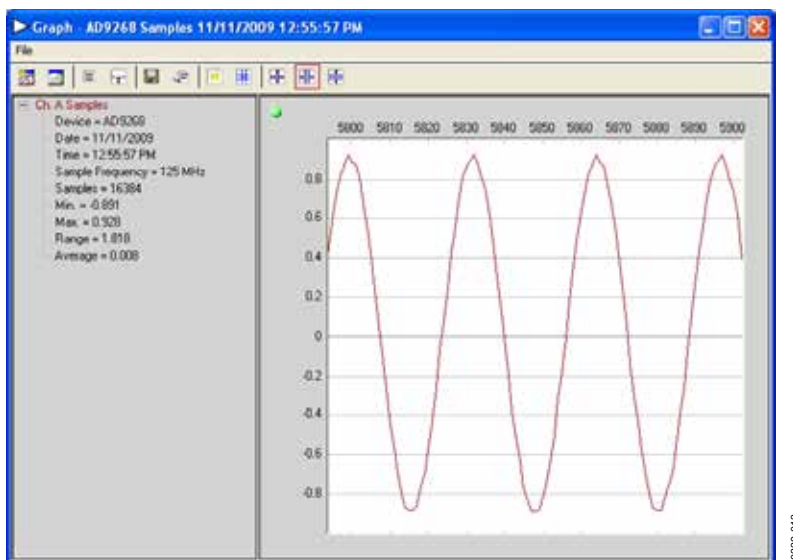


图13. AD9268 ADC的第9位和第10位短接在一起时的时域曲线

在图13所示的时域图中，问题相对不明显。虽然在波峰和波谷处损失了一些平滑度，但当采样速率接近波形频率时，这是常见现象。

## 数据和时钟时序无效时的时域曲线

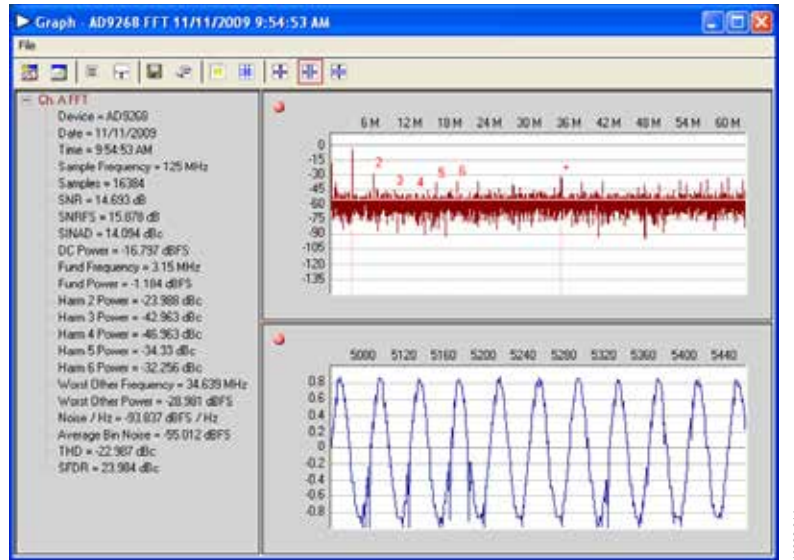


图14. AD9268数据和时钟时序无效时的时域曲线

图14显示了一个因建立/保持问题而导致时序无效的转换器的情况。上述错误一般会在数据的每个周期中出现，而时序错误则不然，通常并不是持续存在。不太严重的时序错误可能是间歇性的。这些图显示了不符合时序要求的数据捕捉的时域和频域曲线。注意，各周期的时域错误并不一致。还应注意FFT/频域的噪底有所提高，这通常表示有一位丢失，原因可能是时序对齐错误。

## 数据和时钟时序无效时的放大时域曲线

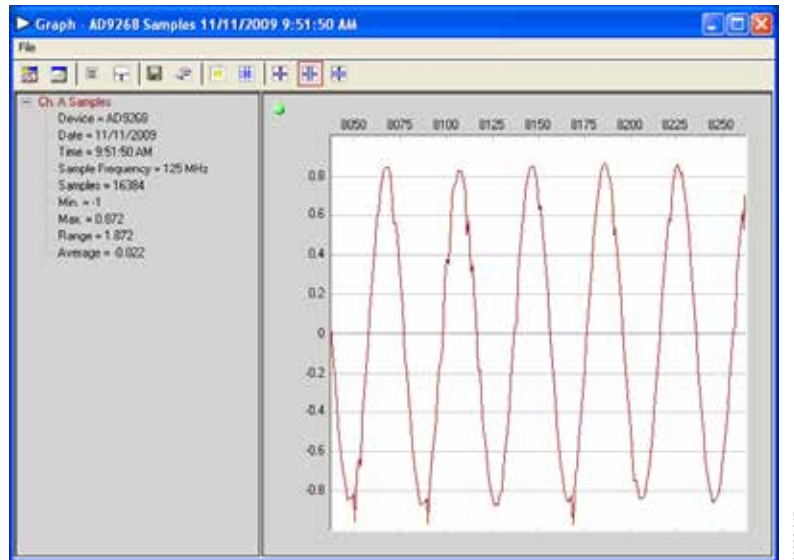


图15. AD9268数据和时钟时序无效时的放大时域曲线

图15是图14所示时域时序误差的放大图。同样应注意，各周期的错误并不一致，但某些错误会重复。例如，该图中有多个周期的谷底上出现负尖峰。

注释

注释