

# 时钟抖动时域分析 第 3 部分

作者: Thomas Neu,  
德州仪器 (TI) 系统与应用工程师

## 引言

本系列文章共 3 个部分, 第 1 部分重点介绍了如何准确估算一个时钟源的抖动, 并将其同 ADC1 的孔径抖动组合在一起。在第 2 部分中, 我们利用这种组合抖动计算 ADC 的信噪比 (SNR), 之后将计算结果与实际测量情况对比。本文是系列文章的第 3 部分, 将为您介绍如何通过改善 ADC 的孔径抖动来进一步提高 ADC 的信噪比。文章将重点介绍如何对时钟信号的转换速率进行优化。

如第 1 部分和第 2 部分所述, 时钟信号带通滤波器是达到 ADC 产品说明书 SNR 值的一个关键组件。时钟信号的远端相位噪声让时钟信号总抖动大量增加, 从而使 SNR 在高输入频率下快速降低。

不幸的是, 带通滤波器存在两个严重的缺点。首先, 它不仅去除了时钟信号的远端相位噪声, 而且也去除了基本时钟频率的高阶奇次谐波, 从而将方波变为正弦波。这些奇次谐波 (3 次谐波、5 次谐波等) 对于达到最小化 ADC 孔径抖动所需的高转换速率而言是必需的。其次, 根据不同的拓扑结构和阶, 它会有一定的损耗, 其一般为 1 到 9dB 不等。这种损耗相当于衰减了时钟振幅, 从而进一步降低了时钟信号的转换速率。

图 21 1.8-V 和 3.3-V 逻辑器件的带通滤波器输入与输出

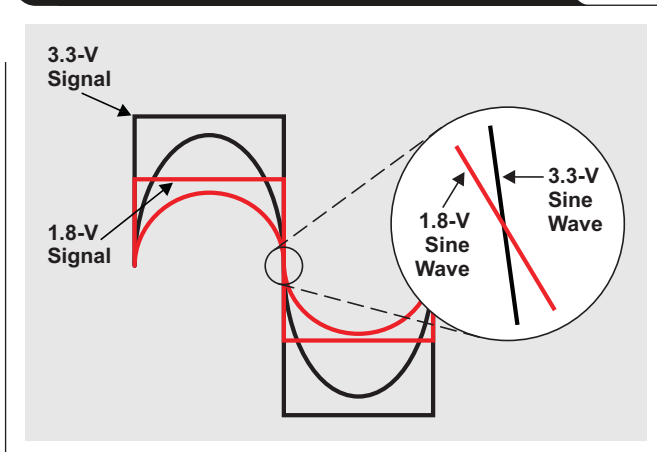
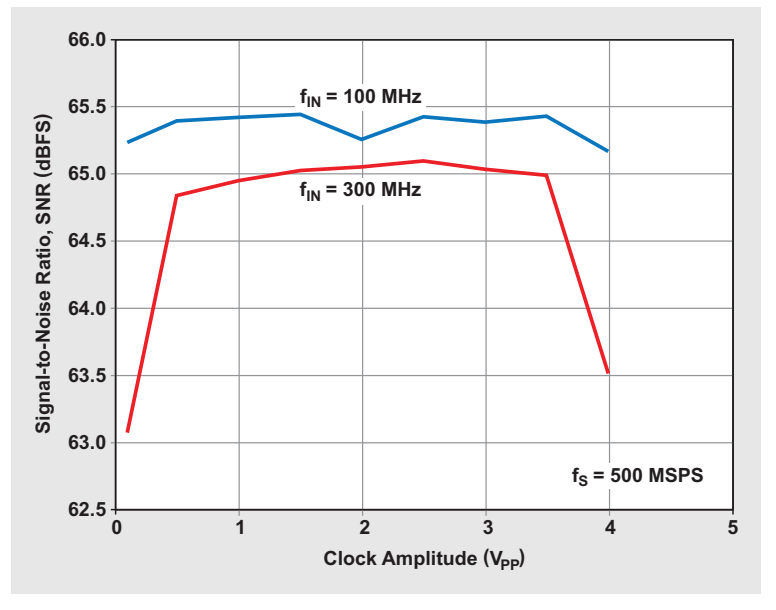


图 20 SNR、时钟振幅和输入频率的关系曲线图 (摘自 ADS54RF63 产品说明书)



ADC 的产品说明书通常会以 SNR 与时钟振幅曲线图的形式表明转换速率对 ADC 的 SNR 性能的影响程度, 如图 20 所示。该图摘自 TI ADS54RF63 产品说明书, 其表明时钟振幅越大, 转换速率就越高。图 20 还表明, 如我们预计的那样, SNR 对时钟转换速率的敏感程度, 随输入频率  $f_{IN}$  的增加而增加。但是, 曲线图也表明, 时钟输入过大可能导致 ADC 内部出现削波或者损坏, 从而对 SNR 产生不利影响。

为了降低固有噪声和功耗, 各大制造厂商都使用更小的工艺节点来生产时钟分配 IC, 最终减少电源轨。例如, 相比一款 3.3-V 器件, 通过一块 1.8-V 器件获得高转换速率时钟信号要困难得多; 另外, 带通滤波器的损耗只会让这种情况雪上加霜 (请参见图 21)。

本文其他部分, 将重点介绍两种实用方法, 说明如何在实际应用中通过“恢复”被去除的时钟谐波, 最大化滤波时钟信号的转换速率。本质上而言, 需要让时钟沿再次呈现为方形, 同时要尽可能地增加

信号摆幅，以补偿带通滤波器 (BPF) 产生的损耗。通过一个有源或者无源电路增加信号增益，可以完成这两项工作（参见图 22）。两种都有自己的优点和缺点，下面我们将对其逐一进行讨论，并说明选择使用哪种方法的一些重要考虑因素。

### 使用一个低噪声放大器获得有源增益

系统设计人员通常不喜欢使用有源增益，原因是其会增加系统的噪声，并且会消耗更大的功率。但是，在一些情况下，它可能是唯一的选项，例如：设计使用了一个超出升压变压器带宽的高时钟频率。

选择放大器，系统设计人员需要考虑如下一些参数：

**带宽规范**——市场上有许多 RF 放大器可供选择，但是能够达到中频 (<250 到 500MHz) 的却寥寥无几。标准 CMOS 放大器的噪声系数不够低 (<2 dB)，因此最佳方法是选择一个 RF 放大器。这种放大器的可用带宽需要足够宽，以包括至少三阶最好是五阶基本时钟频率谐波。因此，用于 122.88-MHz 时钟的放大器至少需要达到 368.64 MHz，而 500-MHz 时钟的放大器则至少需要达到 1.5 GHz。

**噪声系数**——为了最小化低噪声放大器 (LNA) 的额外噪声影响，其噪声系数应至少为 2d 或者更好。大多数 LNA（即使具有低噪声系数），都会增加时钟信号的宽频带噪声。因此，LNA 应该位于时钟分配器件和带通

图 22 增加电路来提高转换速率

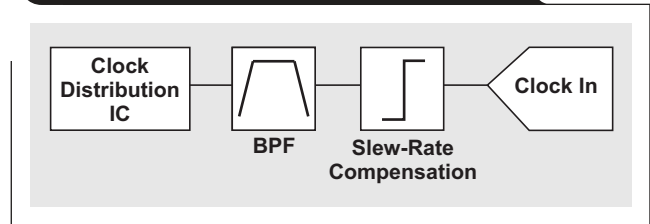
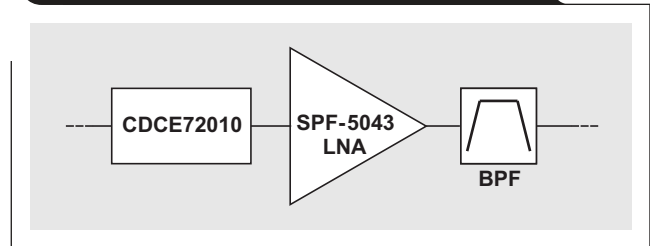
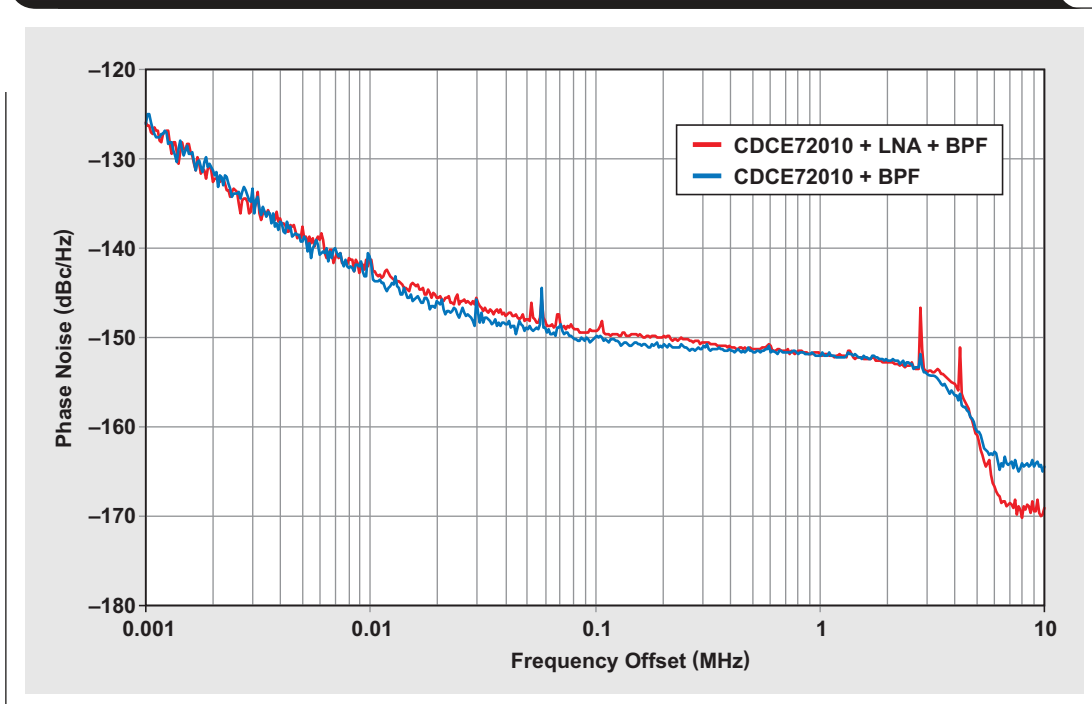


图 23 低功耗 LNA 补偿 BPF 损耗



滤波器 (BPF) 之间（请参见图 23），以限制额外噪声量（请参见图 24）。（图 23 和 24 使用的 TI CDCE72010 也就是本系列文章第 2 部分中举例所使用的时钟同步器）更好的噪声系数一般要求更多的功耗，而这种要求可能会限制我们选择合适的放大器。

图 24 LNA 稍微降低了 BPF 通带内的时钟信号相位噪声



**P1dB 压缩点**——P1dB 压缩点本质上定义了最大可能输出摆幅。要达到约 2 VPP 的时钟信号，需要 P1dB 至少为 10 dBm。

**电压轨**——放大器的电压轨，可以用于避免超出 ADC 时钟引脚的最大电压额定值。但是，要获得最大性能，一个新的电压轨或许是必需的，但这又增加了系统的成本和板级空间。

**稳定性**——低损耗 LC 带通滤波器具有高电抗。RF LNA 的理想情况是驱动 50-Ω 的负载，因此驱动电抗可能会引起不稳定或者失真，并出现讨厌的尖峰，从而要求匹配网络。

**增益**——即使 LNA 工作在与比较器类似的高增益 (>10 到 12 dB) 下，但与本文相结合的研究表明，单纯的比较器并不适合完成这项工作。这些比较器给输出信号增加了太多的噪声，最为常见的情况是其转换速率不够高。

系列文章的第 2 部分，介绍了使用 122.88 MSPS 采样频率驱动 TI ADS54RF63 和 ADS5483 ADC 的 CDCE72010 时钟同步器举例。经过评估，RF 微器件公司 (RF Micro Devices) 提供的 SPF-5043 LNA，成为了本举例的适用放大器（请参见图 23）。为了让 LNA 的额外功耗达到最小，放大器通过一个 3.3-V 电源工作，测得静态电流约为 41 mA，即功耗约为 131 mW。

SPF-5043 产品说明书列举的规范如下：

- 可用带宽达到 100 MHz
- 噪声系数=0.6 dB
- P1dB = ~19 dBm
- 增益= ~22 dB

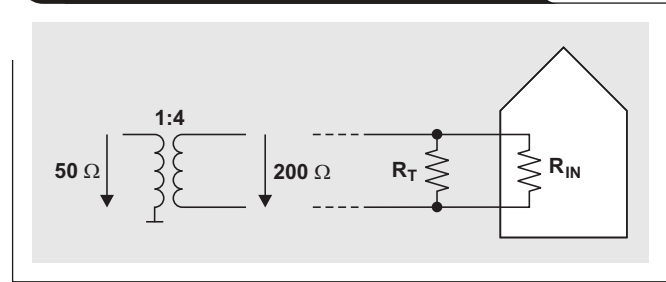
即使该 LNA 的噪声系数确实很低，但 LNA 位于带通滤波器前面而非后面时 SNR 性能会更佳。

SPF-5043 的最大输出电压受到 3.3-V 电压轨的限制。但是，使用升压变压器来将信号从单端信号转换为差分信号时，可能需要采取其他措施，以避免超出 ADC 时钟输入的最大电压额定值。

### 使用一个升压变压器获得无源增益

提高时钟信号转换速率的最简单办法是使用一个升压变压器。由于它是一种无源组件，因此不会增加额外的噪声或者功耗。在一些功耗敏感型或者便携式应用中，基于变压器的解决方案可能是唯一实际的选择；同时，变

图 25 升压变压器改变输入阻抗



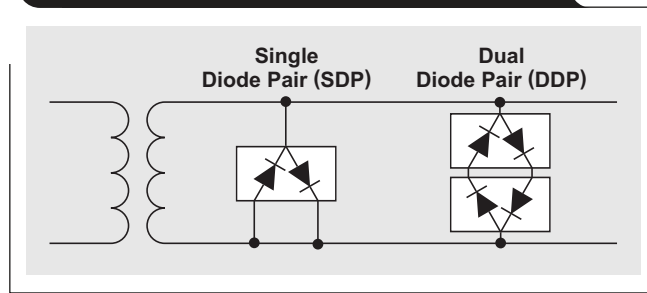
压器常用于时钟路径中，将时钟输入从单端转换为差分。但是，在有些应用中升压变压器却并不实用。在选择时，您需要考虑如下一些参数：

**带宽要求**——变压器自身具有带通滤波器频率响应。随着频率接近 DC，输入和输出之间的磁耦合变得越来越弱，同时在一些高频条件下，变压器寄生现象（例如：内部绕组电容和漏电感等）开始占主导。现有变压器的通带带宽一般低于宽带 LNA（例如：SPF-5043），而频率上限随升压比增加（1: 8 对 1: 4）而降低。

**阻抗转换和变压器阻抗比**——除升高输出电压以外，升压变压器还改变输入阻抗。例如，1: 4 阻抗比的变压器将 50-Ω 电源阻抗变为一个 200-Ω 电源阻抗（请参见图 25）。因此，在选择变压器阻抗比时，需要考虑 ADC 时钟的输入阻抗，原因是其与时钟的输入端 (R<sub>T</sub>) 并联。例如，如果 ADC 时钟的输入阻抗仅为 200 到 300Ω，则一个 1: 8 的升压变压器（即使无任何终端），会给时钟源带来 25 到 40Ω 的负载。这是一个极大负载，可能阻止时钟源产生大摆幅，因为其无法提供足够的输出电流。

**最大电压摆幅**——升压变压器可以轻松地产出大于 5V 的输出电压，其迅速超出了 ADC 时钟输入的最大电压额定值。一个 5-V 转换器通常具有约 5.5V 的最大输入电压，而一个 3.3-V 转换器最大只能承受约 3.6V 的最大电压。超出 ADC 最大电压额定值会缩短其使用寿命，并有可能导致由电气过应力引起的灾难性故障。尽管时钟输入一般具有 ESD 二极管保护，但是，光依靠它来保护并非最佳办法。实现电气过应力保护的一种更好办法是使用外部削波二极管。

图 26 使用削波二极管实现 ADC 输入保护



### 使用肖特基削波二极管

使用削波二极管是防止数据转换器输入超出最大电压额定值的一种常见方法。由于低电容肖特基二极管（例如：Avago Technologies 公司的 HSMS-2812），可以保持较高的转换速率，因此它们非常适合于 RF 和高速应用。HSMS-2812 拥有 410 mV 的正向电压。使用一对逆平行二极管（请参见图 26），可以形成  $\pm 410$  mV (820 mV<sub>PP</sub>) 的差动削波电压。对于那些要求更高时钟振幅的 ADC 而言，可以背靠背地放置两对逆平行二极管，从而让削波电压增加一倍，达到  $\pm 820$  mV (1.64 V<sub>PP</sub>)。

图 27 显示了有和无单二极管对 (SDP) 两种情

况下使用 1:4 变压器时，产生的 CDCE72010 滤波 LVCMOS 输出。该图还显示了一个 SDP 和一个背靠背双二极管对 (DDP) 情况下，使用 1:8 变压器时所产生输出。我们可以看到，使用 1:4 变压器时，SDP 将正弦波振幅从约 1.6 降低至 0.9V<sub>PP</sub>。但是，削波之后的输出波形不再像是一种纯正弦波，而是看起来像方波。

我们注意到一种有趣的现象：使用 SDP 结构以后，使用 1:4 和 1:8 变压器之间好像没有振幅差异，尽管后者的波形像是具有稍高一些的转换速率。就 1:8 变压器的 DDP 结构而言，输出振幅约为 1.6V<sub>PP</sub>，并且在零交叉点附近转换速率更高一些。

图 27 不同变压器和削波二极管结构的时钟信号

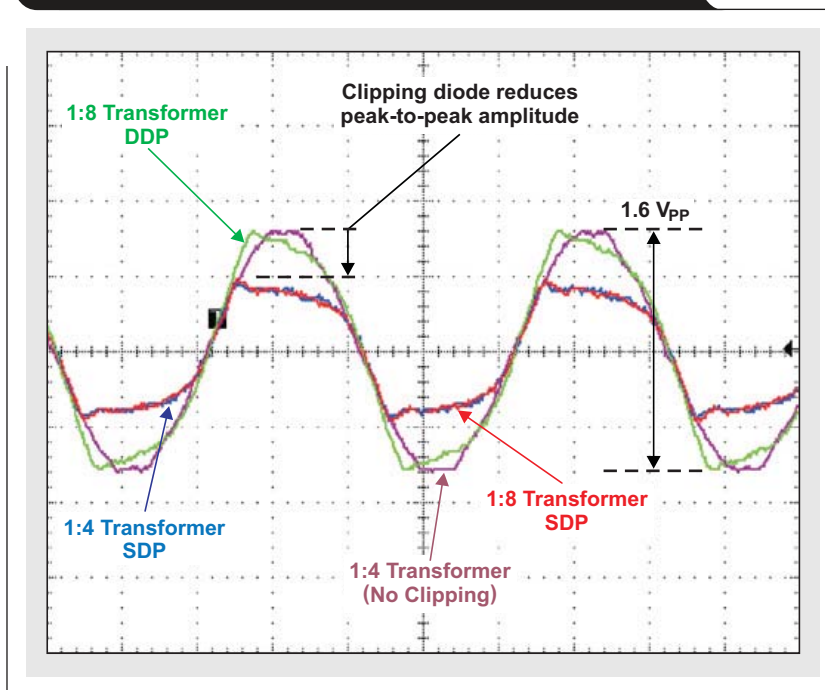
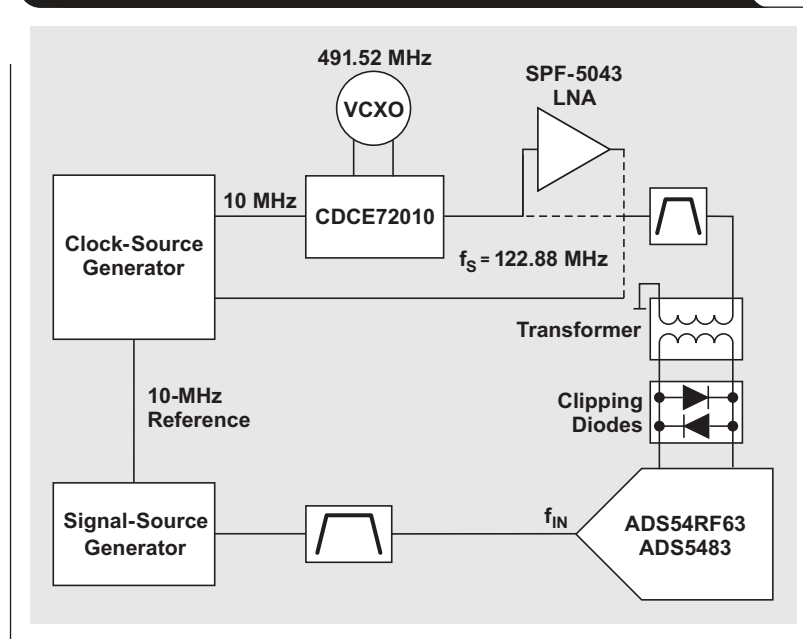


图 28 测试不同有源及无源增益电路的配置



### SNR 测量

对于外部时钟转换速率限制引起的 ADC 孔径性能下降是否可以改善，人们曾经做过研究。我们对使用升压变压器（SPF-5043 LNA）的不同结构和削波二极管都做了测试，目的是在使用现实时钟解决方案（例如：CDCE72010等）而非低抖动时钟源生成器时，最大化 ADC 的 SNR，如图 28 所示。

正如在本系列文章第 2 部分中所强调的那样，CDCE72010 的滤波 LVCMOS 输出具有约 90 fs 的时钟抖动，而时钟源生成器却仅有约 35 fs。尽管这种时钟抖动差异让 CDCE72010 无法达到使用时钟源生成器时一样的 SNR，但我们的目的是找到一种能够最大化地缩小这种 SNR 差的配置结构。ADS54RF63 ADC 工作在 122.88 MSPS 采样频率 ( $f_s$ ) 和 1.0 GHz 输入频率 ( $f_{IN}$ ) 下。ADS5483 ADC 的  $f_s$  相同，但  $f_{IN}$  为 100 MHz。

请检查下列各项参数：

- 使用一个 LNA 增加 CDCE72010 的输出电压和转换速率
- 1 : 1、4 : 1、8 : 1 和 16 : 1 比的升压变压器（Coilcraft WBC 系列和 Mini-Circuits ADT 系列）
- Avago 公司 HSMS-2812 削波二极管—可以为逆平行配置的 SDP 或者背靠背 DDP。

### ADS54RF63 测量

ADS54RF63 评估板 (ADS54RF63EVM) 的默认配置使用一个 Coilcraft WBC4-1 升压变压器，且在使用低抖动时钟源生成器时基准 SNR 约为 60.7 dBFS。如果 LVCMOS 输出的 CDCE72010 用作时钟源，则 SNR 降至 57.8 dBFS。但是，时钟抖动仅约为 90 fs 时，理论上应该可以获得 60 dBFS 以上的 SNR。因此，至少有 2.2-dB 的提高空间。

图 29  $f_s = 122.88$  MSPS 和  $f_{IN} = 1$  GHz 时使用 ADS54RF63 的不同时钟输入结构的测得 SNR

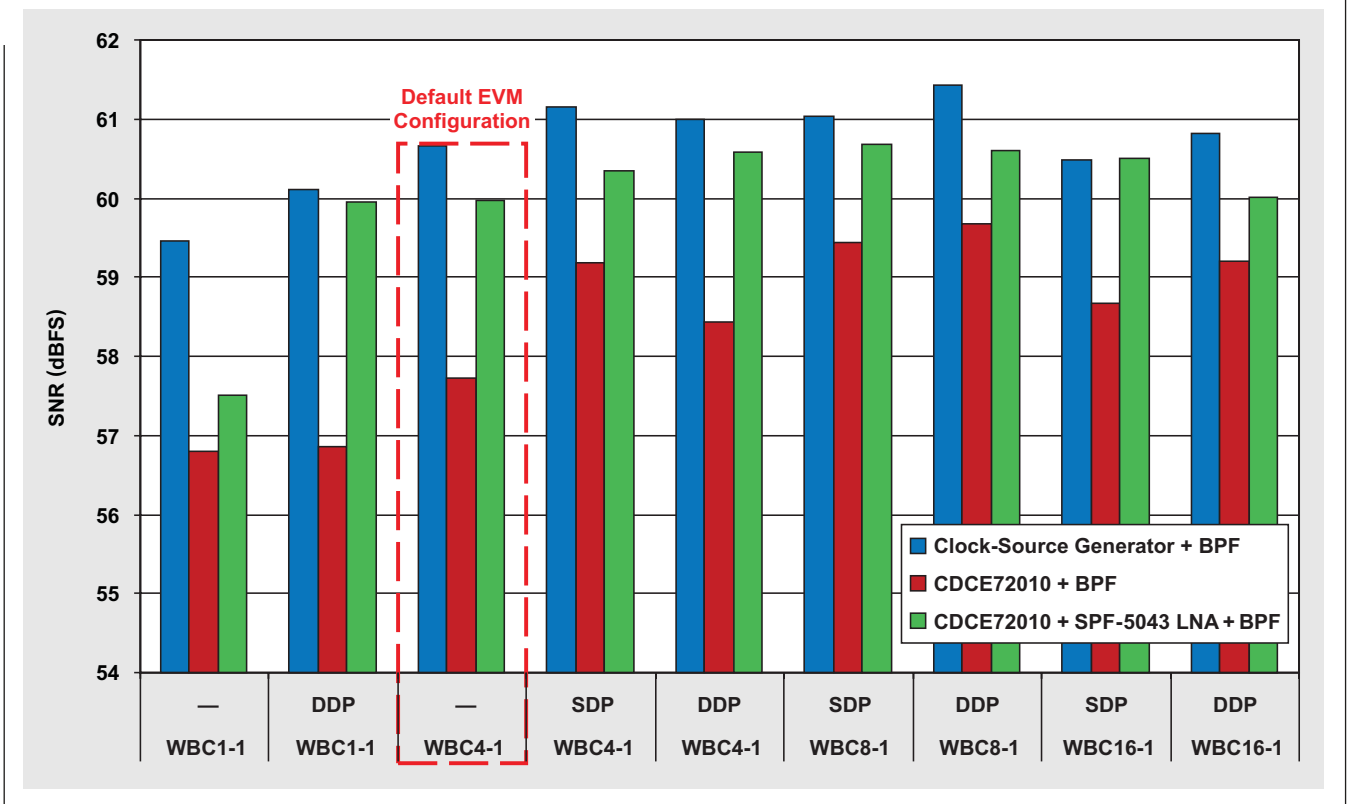
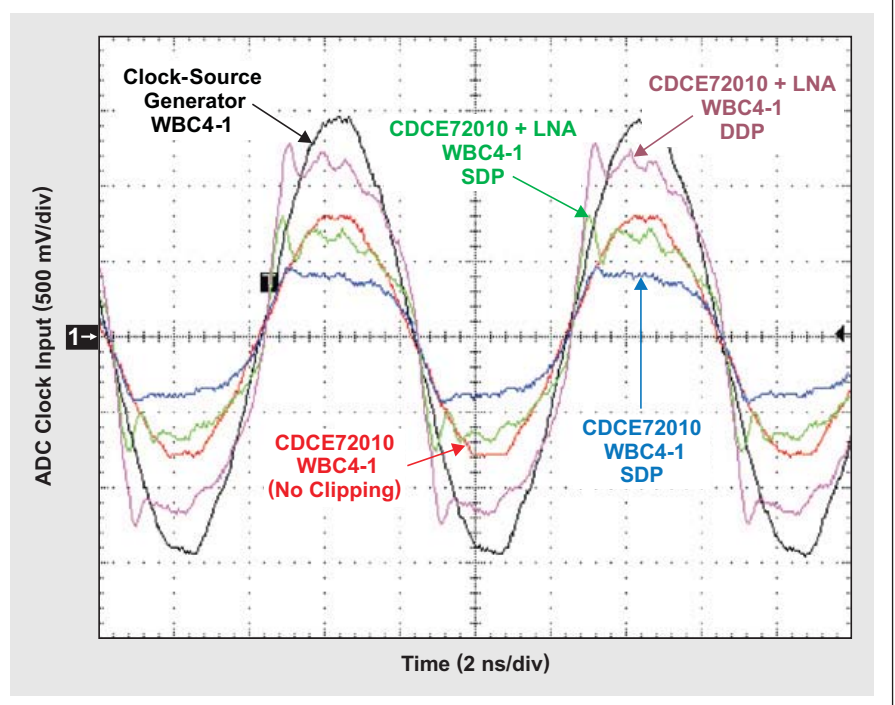


图 29 显示了不同的 EVM 时钟输入配置以及 ADS54RF63 的测得 SNR 值。我们可以看到，利用默认的 WBC4-1 升压变压器，单是削波二极管好像就已改善了 SNR，而增加 SPF-5043 LNA 以后更是极大地提高了 SNR。单二极管对 (SDP) 配置与 WBC4-1 变压器和 LNA 一起，将 SNR 提高到约 60.4 dBFS，即提高了 2.6-dB！单纯的无源解决方案，使用 WBC8-1 变压器和一个 SDP（没有 LNA），得到约 59.5 dBFS 的 SNR，非常接近于 60-dBFS 目标。

图 30 显示了不同配置产生的时钟输入波形的对比情况。低抖动时钟源生成器与 WBC4-1 升压变压器一起，提供非常高的转换速率。图 30 表明，CDCE72010 的滤波输出具有更小的峰到峰振幅，带来更低的转换速率，从而对 ADC 的孔径抖动产生不利影响。给该配置增加 SDP 似乎可以稍稍

图 30 不同时钟源和削波二极管结构的输入波形



提高零交叉点附近的转换速率，表现出更高的 SNR 性能。为 CDCE72010 输出增加高增益 LNA，会向削波二极管发送更高转换速率的大信号。这样导致更加快速地从零交叉点跃迁过去，其反过来又进一步改善了 ADC 的孔径抖动。在零交叉点以前，双二极管对 (DDP) 配置似乎立刻就让转换速率得到了一点改善。但是，图 30 同时也表明，如果在没有 LNA 的情况下使用 CDCE72010 和 WBC4-1 变压器，输出电压可能会太低，以至于不能完全触发削波事件。图 29 所示测量结果表明，使用 WBC8-1 升压变压器和 DDP 获得了更好的 SNR 性能。

**ADS5483 测量**

ADS5483EVM 在时钟输入端使用了一个 Mini-Circuits ADT4-1WT 升压变压器。低抖动时钟源的基准 SNR 为 78.2 dBFS，而 CDCE72010 输出得到的 SNR 约为 76.8 dBFS。90 fs 左右时钟抖动的 CDCE72010，应该提供约 77.6 dBFS 的 SNR，即提高了近 1 dB。

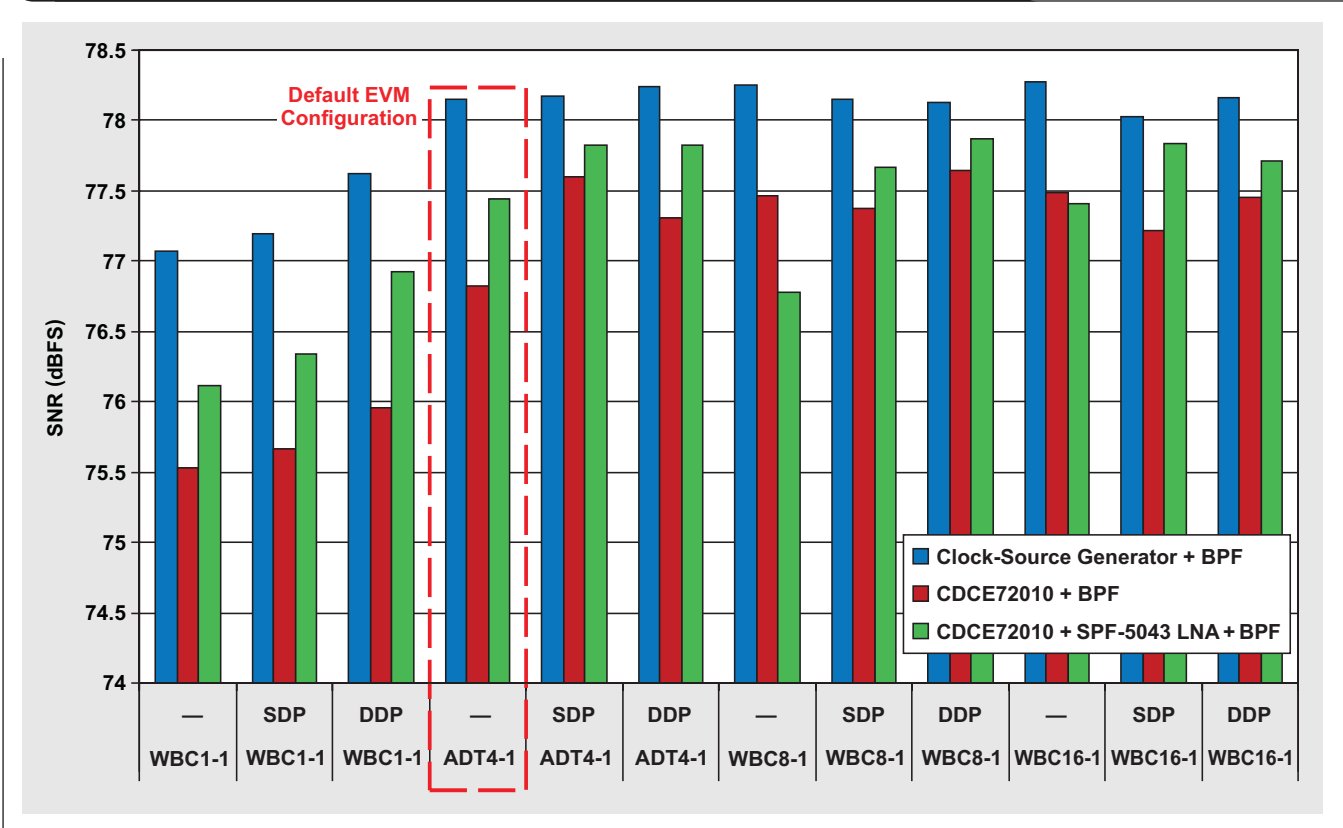
图 31 显示了使用各种 EVM 时钟输入配置时 ADS5483 的测得 SNR 值。为 ADT4-1WT 变压器增加 SDP，提高了转换速率，CDCE72010 的 SNR 提高了近 1 dB，达到 77.6-dBFS 目标值。更大的升压比，似乎没有更大的用

处。除 ADT4-1WT 以外再增加 LNA，将 SNR 提高到约 77.8 dBFS。我们还应该注意，和我们所预计的一样，更低的时钟振幅 (WBC1-1) 极大地降低了 SNR。

**结论**

正如我们在第 1 部分和第 2 部分文章中描述的那样，ADC 孔径抖动并非是固定不变的，而是取决于时钟输入转换速率。要想尽可能地最小化时钟抖动，带通滤波器是必需的，但它又会滤掉高阶谐波，从而降低时钟的转换速率。本文为您介绍了一些方法，教您如何提高现有带通滤波器时钟解决方案的转换速率，从而将 ADC 的 SNR 提升数分贝。SNR 测量表明，时钟信号转换速率提高以后，ADC 的 SNR 达到了给定时钟抖动量条件下我们预计的 SNR。

图 31  $f_S = 122.88$  MSPS 和  $f_{IN} = 100$  MHz 时使用 ADS5483 的不同时钟输入配置的测得 SNR



**参考文献**

如欲了解本文相关更多详情，敬请访问 [www.ti.com/lit/litnumber](http://www.ti.com/lit/litnumber)（使用TI文件编号替换网址中的“litnumber”），下载 Acrobat® Reader® 格式文件，获取下列参考资料。

**相关网站**

**Dataconverter.ti.com**

[www.ti.com/sc/device/partnumber](http://www.ti.com/sc/device/partnumber)（用ADS5483、ADS54RF63或者CDCE72010替换网址中的“partnumber”）

**文献标题**

**TI文献编号**

- 1、《时钟抖动时域分析，第1部分》，作者：Thomas Neu 发表于《模拟应用杂志》（2010年第3季度刊） ..... slyt379
- 2、《时钟抖动时域分析，第2部分》，作者：Thomas Neu 发表于《模拟应用杂志》（2010年第4季度刊） ..... slyt389
- 3、《12位、500-/550-MSPS模数转换器》，ADS5463/54RF63产品说明书..... slas515



## 重要声明

德州仪器(TI) 及其下属子公司有权在不事先通知的情况下, 随时对所提供的产品和服务进行更正、修改、增强、改进或其它更改, 并有权随时中止提供任何产品和服务。客户在下订单前应获取最新的相关信息, 并验证这些信息是否完整且是最新的。所有产品的销售都遵循在订单确认时所提供的TI 销售条款与条件。

TI 保证其所销售的硬件产品的性能符合TI 标准保修的适用规范。仅在TI 保证的范围内, 且TI 认为有必要时才会使用测试或其它质量控制技术。除非政府做出了硬性规定, 否则没有必要对每种产品的所有参数进行测试。

TI 对应用帮助或客户产品设计不承担任何义务。客户应对其使用TI 组件的产品和应用自行负责。为尽量减小与客户产品和应用相关的风险, 客户应提供充分的设计与操作安全措施。

TI 不对任何TI 专利权、版权、屏蔽作品权或其它与使用了TI 产品或服务的组合设备、机器、流程相关的TI 知识产权中授予的直接或隐含权限作出任何保证或解释。TI 所发布的与第三方产品或服务有关的信息, 不能构成从TI 获得使用这些产品或服务的许可、授权、或认可。使用此类信息可能需要获得第三方的专利权或其它知识产权方面的许可, 或是TI 的专利权或其它知识产权方面的许可。

对于TI 的产品手册或数据表, 仅在没有对内容进行任何篡改且带有相关授权、条件、限制和声明的情况下才允许进行复制。在复制信息的过程中对内容的篡改属于非法的、欺诈性商业行为。TI 对此类篡改过的文件不承担任何责任。

在转售TI 产品或服务时, 如果存在对产品或服务参数的虚假陈述, 则会失去相关TI 产品或服务的明示或暗示授权, 且这是非法的、欺诈性商业行为。TI 对此类虚假陈述不承担任何责任。

TI 产品未获得用于关键的安全应用中的授权, 例如生命支持应用(在该类应用中一旦TI 产品故障将预计造成重大的人员伤亡), 除非各方官员已经达成了专门管控此类使用的协议。购买者的购买行为即表示, 他们具备有关其应用安全以及规章衍生所需的所有专业技术和知识, 并且认可和同意, 尽管任何应用相关信息或支持仍可能由TI 提供, 但他们将独力负责满足在关键安全应用中使用其产品及TI 产品所需的所有法律、法规和安全相关要求。此外, 购买者必须全额赔偿因在此类关键安全应用中使用TI 产品而对TI 及其代表造成的损失。

TI 产品并非设计或专门用于军事/航空应用, 以及环境方面的产品, 除非TI 特别注明该产品属于“军用”或“增强型塑料”产品。只有TI 指定的军用产品才满足军用规格。购买者认可并同意, 对TI 未指定军用的产品进行军事方面的应用, 风险由购买者单独承担, 并且独力负责在此类相关使用中满足所有法律和法规要求。

TI 产品并非设计或专门用于汽车应用以及环境方面的产品, 除非TI 特别注明该产品符合ISO/TS 16949 要求。购买者认可并同意, 如果他们在汽车应用中使用任何未被指定的产品, TI 对未能满足应用所需要求不承担任何责任。

可访问以下URL 地址以获取有关其它TI 产品和应用解决方案的信息:

	产品		应用
数字音频	<a href="http://www.ti.com.cn/audio">www.ti.com.cn/audio</a>	通信与电信	<a href="http://www.ti.com.cn/telecom">www.ti.com.cn/telecom</a>
放大器和线性器件	<a href="http://www.ti.com.cn/amplifiers">www.ti.com.cn/amplifiers</a>	计算机及周边	<a href="http://www.ti.com.cn/computer">www.ti.com.cn/computer</a>
数据转换器	<a href="http://www.ti.com.cn/dataconverters">www.ti.com.cn/dataconverters</a>	消费电子	<a href="http://www.ti.com/consumer-apps">www.ti.com/consumer-apps</a>
DLP® 产品	<a href="http://www.dlp.com">www.dlp.com</a>	能源	<a href="http://www.ti.com/energy">www.ti.com/energy</a>
DSP - 数字信号处理器	<a href="http://www.ti.com.cn/dsp">www.ti.com.cn/dsp</a>	工业应用	<a href="http://www.ti.com.cn/industrial">www.ti.com.cn/industrial</a>
时钟和计时器	<a href="http://www.ti.com.cn/clockandtimers">www.ti.com.cn/clockandtimers</a>	医疗电子	<a href="http://www.ti.com.cn/medical">www.ti.com.cn/medical</a>
接口	<a href="http://www.ti.com.cn/interface">www.ti.com.cn/interface</a>	安防应用	<a href="http://www.ti.com.cn/security">www.ti.com.cn/security</a>
逻辑	<a href="http://www.ti.com.cn/logic">www.ti.com.cn/logic</a>	汽车电子	<a href="http://www.ti.com.cn/automotive">www.ti.com.cn/automotive</a>
电源管理	<a href="http://www.ti.com.cn/power">www.ti.com.cn/power</a>	视频和影像	<a href="http://www.ti.com.cn/video">www.ti.com.cn/video</a>
微控制器 (MCU)	<a href="http://www.ti.com.cn/microcontrollers">www.ti.com.cn/microcontrollers</a>		
RFID 系统	<a href="http://www.ti.com.cn/rfidsys">www.ti.com.cn/rfidsys</a>		
OMAP 机动性处理器	<a href="http://www.ti.com/omap">www.ti.com/omap</a>		
无线连通性	<a href="http://www.ti.com.cn/wirelessconnectivity">www.ti.com.cn/wirelessconnectivity</a>		
	德州仪器在线技术支持社区		<a href="http://www.deyisupport.com">www.deyisupport.com</a>

邮寄地址: 上海市浦东新区世纪大道 1568 号, 中建大厦 32 楼 邮政编码: 200122  
Copyright © 2011 德州仪器 半导体技术(上海)有限公司