

Application Note
适用于 TI 超声波 AFE 的连续波多普勒信号链设计



Zichen Liu and Hailey Chen

摘要

在超声波扫描仪中，只有一组传感器用于发送和接收功能（使用 T/R 开关逐个执行）。此设备可以扫描体内的静止目标，例如组织和骨骼。由于血液不是静止的，因此必须具有连续或同时发送和接收的功能。为此，同一个传感器一分为二后可以同时实现发送和接收。连续波 (CW) 多普勒是一种在同时执行发送和接收功能时捕获回波的模式。根据多普勒效应，可以计算出血液速度和其他参数。CW 多普勒是中高端超声波系统中的重要功能，必须能够处理高动态范围并提供严格的相位噪声性能。本应用手册将重点介绍 CW 多普勒路径面临的主要挑战，并提出四种实现低噪声性能的解决方案。

内容

1 简介.....2

2 CWD 方框图和设计.....2

 2.1 方案 1.....2

 2.2 方案 2.....3

 2.3 方案 3.....5

 2.4 方案 4.....7

3 设计方案比较.....8

4 总结.....9

5 参考文献.....9

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

连续波多普勒 (CWD) 是超声波系统中要求最严格的临床诊断工具之一。遗憾的是，设计 CWD 系统并不容易，因为接收的 CWD 信号同时包含身体组织的强信号（通常称为杂波）和流动血液中非常弱的多普勒信号。接收通道输入端的典型杂波信号可高达 200mVpp，而反射的多普勒信号则很弱，信号幅度很小，在 μV 至 mV 范围内。为了接收 CWD 信号，需要先使用混频器来解调 CWD 信号，然后从每个接收通道对解调后的 CWD 信号求和，从而增强 SNR。TI 的 AFE 在芯片中集成了高性能混频器和加法器。然而，在实际设计中，一台典型的超声波设备可能有 4 到 16 个 AFE。设计人员必须对 AFE 外部的 CWD 信号求和。因此，设计人员必须设计一个低噪声、高带宽的求和电路。对于较简单的求和电路，这里首选使用全差分放大器，因为来自 AFE 的输出 CWD 信号是全差分信号。对于大多数设计人员而言，这并不简单。由于多普勒信号较弱，ADC 的量化噪声可能是影响系统性能的另一个因素。如前所述，这对于设计人员来说是一个挑战。本应用手册提出了四种具有不同性能、尺寸和成本的设计方案，旨在满足客户的各种要求。

2 CWD 方框图和设计

图 2-1 展示了一个典型的 CWD 接收系统。CWD 接收信号链中有四个主要的组成部分，包括超声波接收 AFE、求和网络、放大和滤波电路以及采样 ADC。求和网络分别对来自 I 和 Q 输出通道的所有 I 和 Q 信号求和，然后产生差分 I 和 Q 信号以供分析。I 和 Q 信号的最大信号频率范围为 10kHz 至 100kHz。为了将这些信号数字化，ADC 的采样速度至少是最大输入频率的 10 倍。此外，还需要 16 位或更高的高分辨率来精确测量血液速度。为了更好地调节输入信号，通常使用全差分放大器 (FDA) 来驱动 ADC。在选择 ADC 驱动器放大器时，必须考虑高速和低噪声性能。更多有关如何驱动 SAR ADC 的信息，请参阅 [TI ADC 高精度实验室](#)。

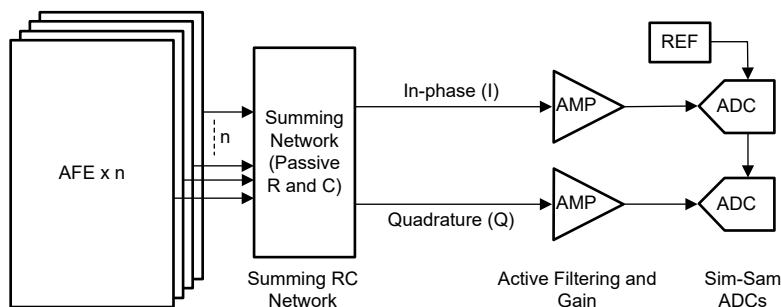


图 2-1. CWD 方框图

根据图 2-1，TI 目前提供四种方案。

2.1 方案 1

如图 2-2 所示，方案 1 采用 THS4552 和 ADS9224 作为 CWD 信号链。ADS9224 是 TI 于 2019 年推出的 16 位 ADC，这款器件具有内部基准和 3MSPS 采样率。由于 CWD 信号分为同相信号和正交信号，因此需要两个放大器和两个采样 ADC，而 ADS9224 和 THS4552 都具有两个通道，所以单个 ADS9224 和 THS4552 即可满足 CWD 信号链要求。此方案适用于小尺寸、成本敏感型设备，例如具有低动态范围要求的手持式或便携式超声波设备。此设计的一个好处是客户可以实施过采样，以低成本获得优于 16 位的分辨率。

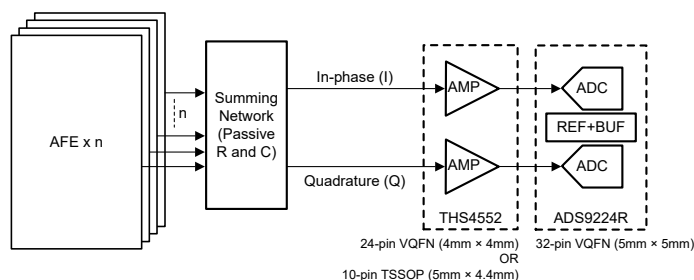


图 2-2. 方案 1 ADS9224 和 THS4552

噪声是电气工程师面临的一个棘手问题。对于 CWD 系统，情况更糟，因为 CWD 系统中的反射信号电势非常弱。通常，设计人员需要针对 CWD 应用评估电路的噪声性能。图 2-3 展示了用于评估方案 1 噪声性能的仿真电路。在实际电路设计中，有几个使用串联电阻的输入信号，用于增强来自不同 AFE 的 CWD 信号。在仿真中，我们会使用一个等效电阻来替换这些电阻。图 2-4 展示了方案 1 仿真的频率响应和噪声性能。

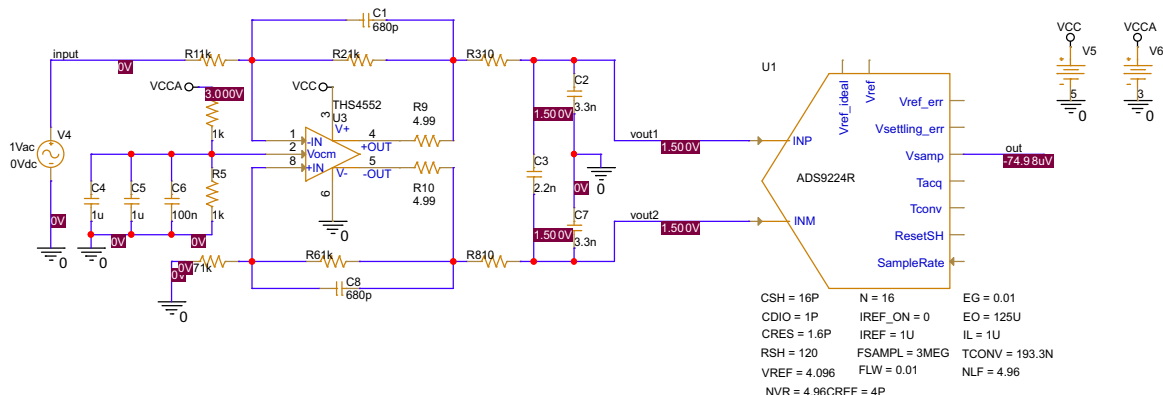


图 2-3. 方案 1 仿真电路

方案 1 噪声和振幅频率特性。

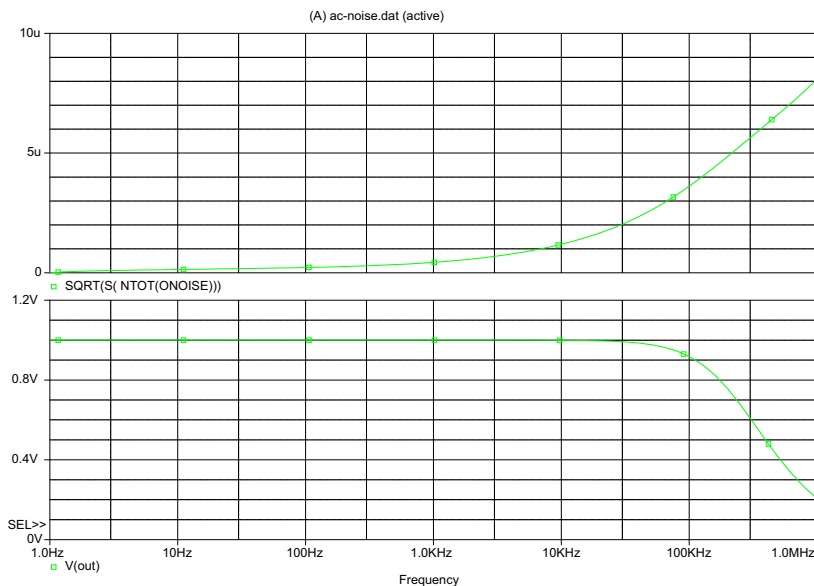


图 2-4. 方案 1 交流和噪声性能

根据方案 1 的仿真结果，1MHz 带宽内的总积分噪声约为 8.207uV。

2.2 方案 2

如图 2-5 所示，方案 2 采用 ADS8881 和 THS4551 作为 CWD 信号链；其中，ADS8881 是 TI 于 2015 年推出的单通道 1MSPS 18 位 SAR ADC，现已广泛应用于超声波 CWD 系统，专为通用超声波设备而设计。由于 ADS8881 和 THS4551 都是单通道类型，因此需要使用两个 ADS8881 和 THS4551 对 CWD 信号进行采样，而且由于 ADS8881 没有内部基准，此方案中使用了额外的基准源 REF70，这是 TI 于 2023 年推出的超低噪声、超低漂移电压基准源。

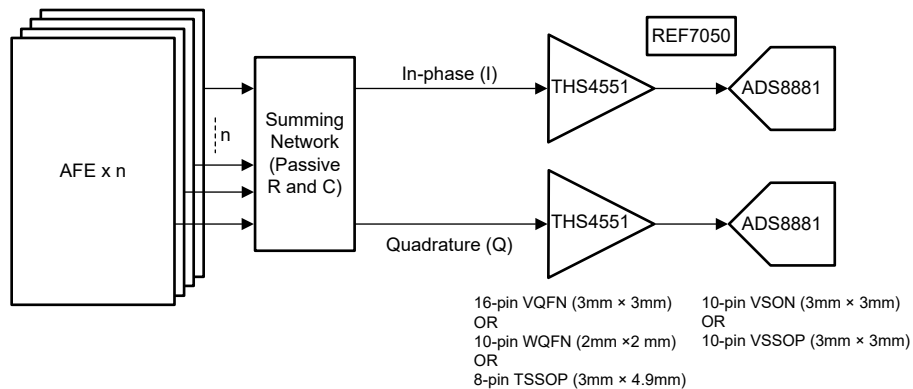


图 2-5. 方案 2 ADS8881 和 THS4551

图 2-6 和图 2-7 展示了用于仿真的电路以及仿真结果。方案 2 的噪声和振幅频率特性仿真。

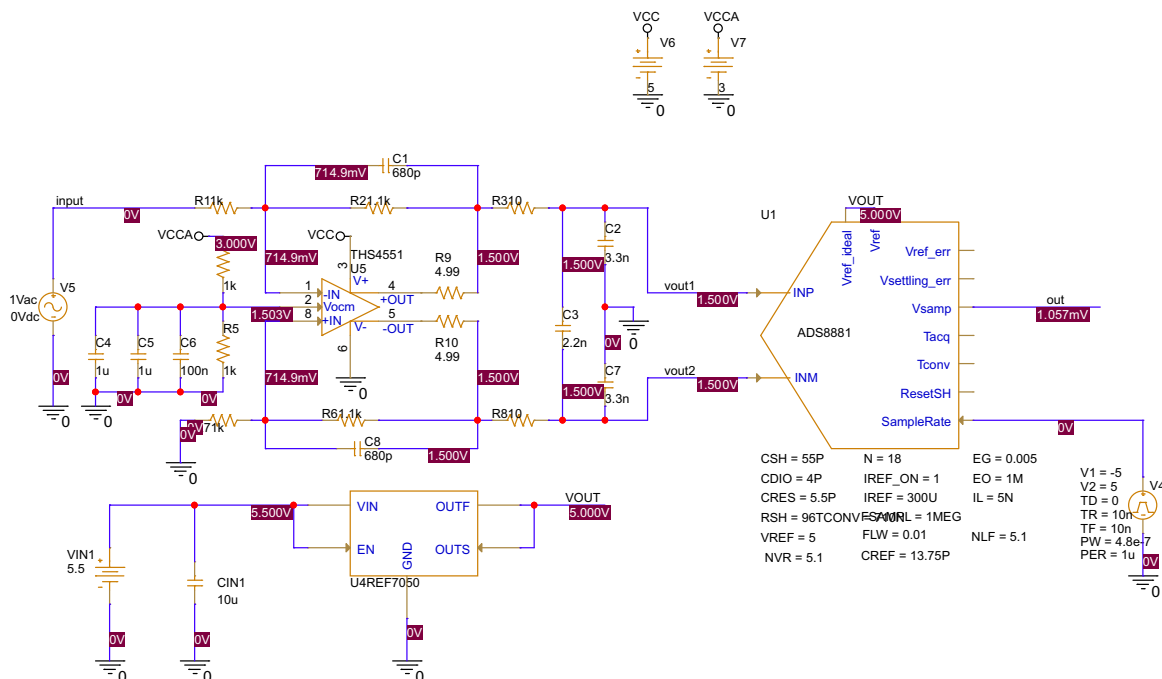


图 2-6. 方案 2 仿真电路

方案 2 噪声和振幅频率特性。

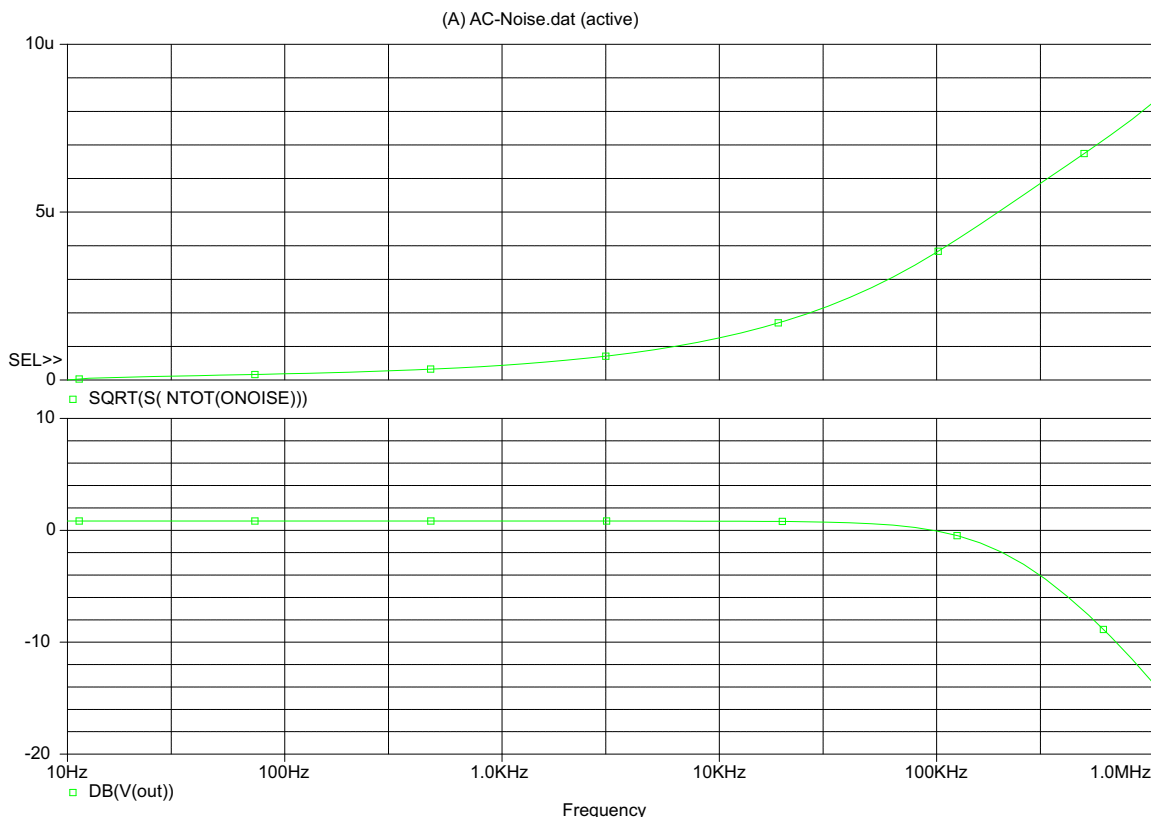


图 2-7. 方案 2 交流和噪声性能

如仿真结果所示，ADS8881 在 1MHz 带宽内的积分噪声为 8.28uV，略高于 ADS9224，但由于整体的输入范围更高，因此总体 SNR 仍高于 ADS9224R。

2.3 方案 3

如图 2-8 所示，方案 3 采用了 ADS8900B 器件，这款器件是 TI 于 2017 年推出的 1MSPS 20 位 SAR ADC，由于 ADS8900B 没有内部基准，因此还需要使用 REF70 作为外部基准。此方案在本文的所有 SAR ADC 方案中具有最高的信噪比和动态范围。此方案专为高端超声波器件 CWD 应用而设计，旨在获得较高的图像质量。

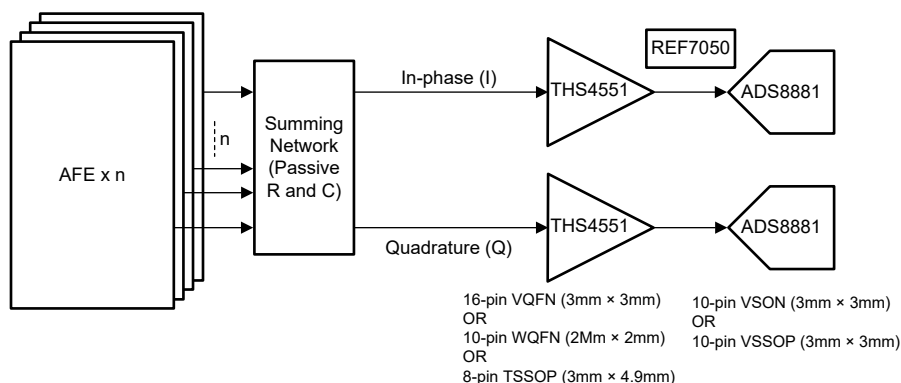


图 2-8. 方案 3 ADS8900B 和 THS4551

方案 3 的噪声和振幅频率特性仿真。

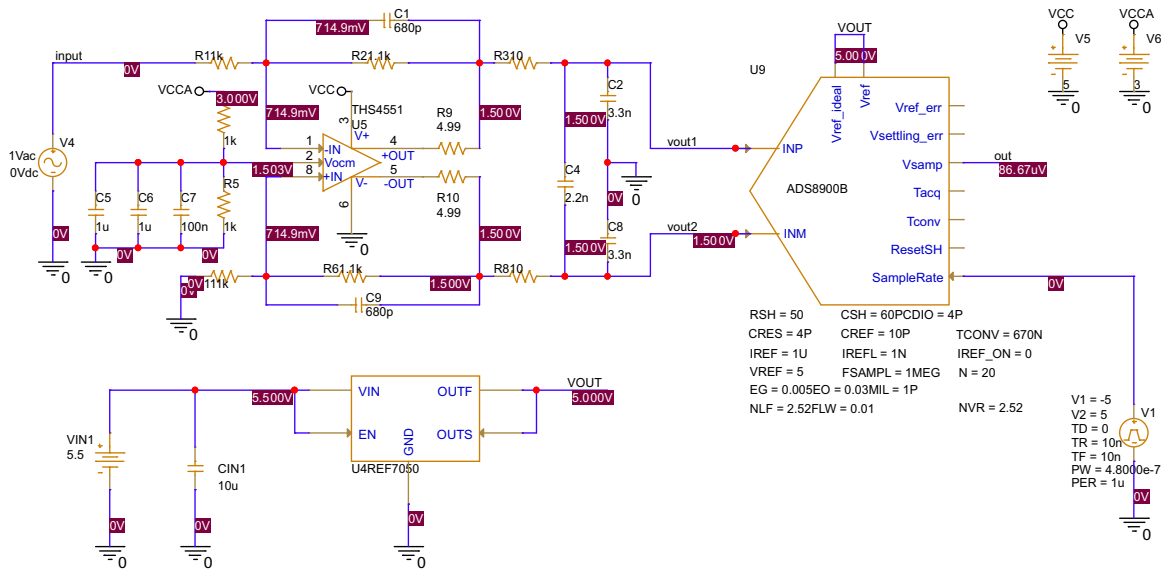


图 2-9. 方案 3 仿真电路

方案 3 噪声和振幅频率特性。

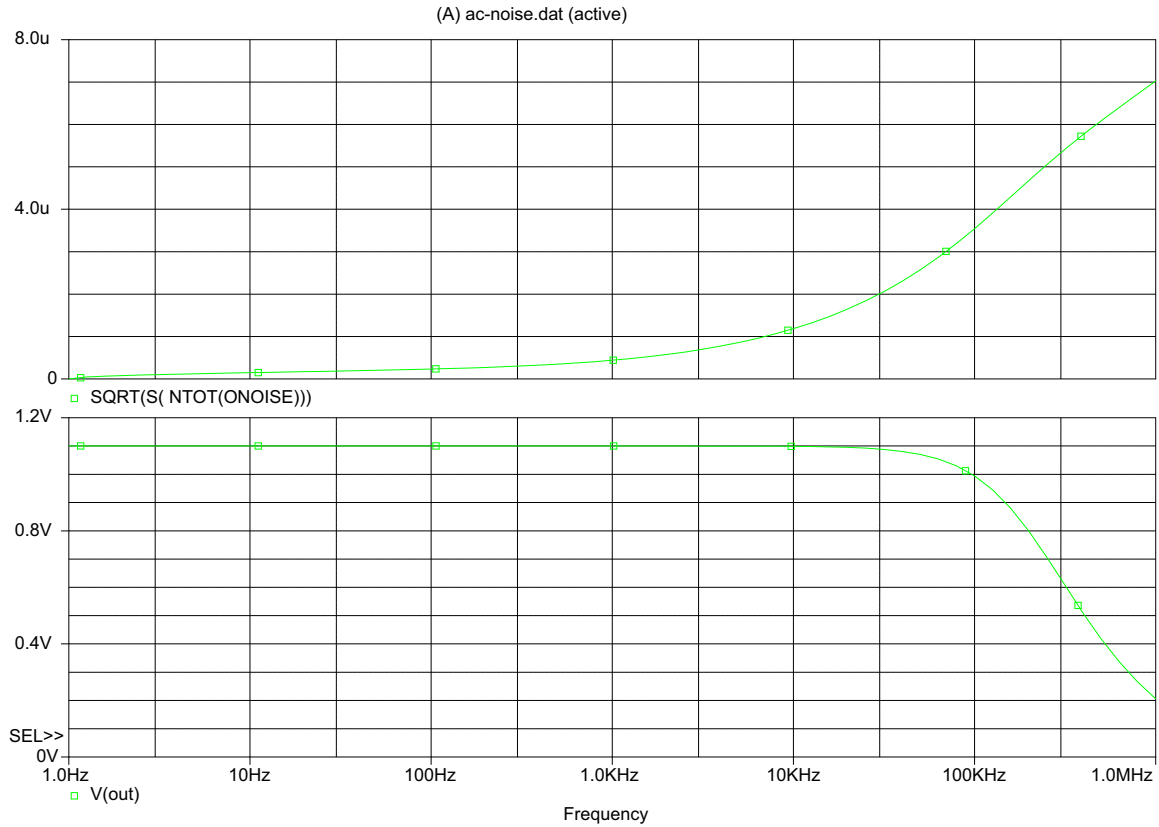


图 2-10. 方案 3 交流和噪声性能

如方案 3 的仿真结果所示，方案 3 在所有 SAR ADC 方案中具有最低的总积分噪声、最高的信噪比和动态范围。

2.4 方案 4

如图 2-11 所示，方案 4 采用了 ADS127L21 器件，这款器件是 TI 于 2023 年推出的 1.365MSPS 24 位 Δ - Σ ADC，由于 ADS127L21 没有内部基准，因此 ADS127L21 还会使用 REF7050 作为外部基准。此方案基于最高采样位和过采样技术，具有最高的信噪比和动态范围。此方案专为高端超声波器件 CWD 应用而设计，旨在获得最佳图像质量。

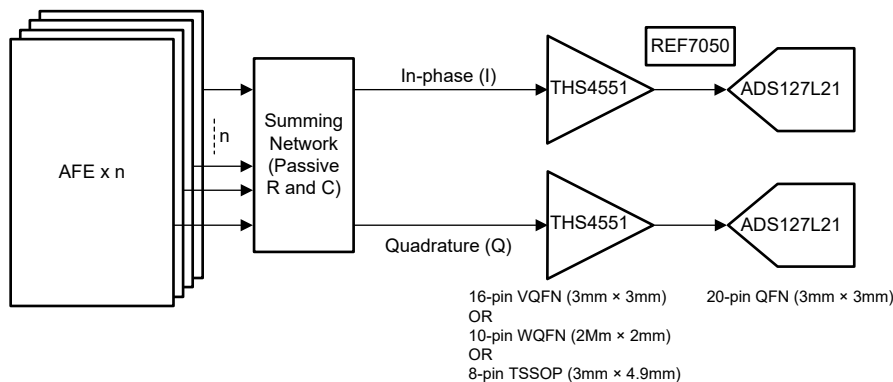


图 2-11. 方案 4 ADS127L21 和 THS4551

1. 方案 4 噪声计算

如图 2-12 所示，由于 ADS127L21 的仿真模型尚未在 TI.com 中发布，因此我们无法在 PSPICE 或 TINA 中进行仿真，但我们可以使用模拟工程师计算器来进行计算。如需更多详细信息，请参阅 TI.com。

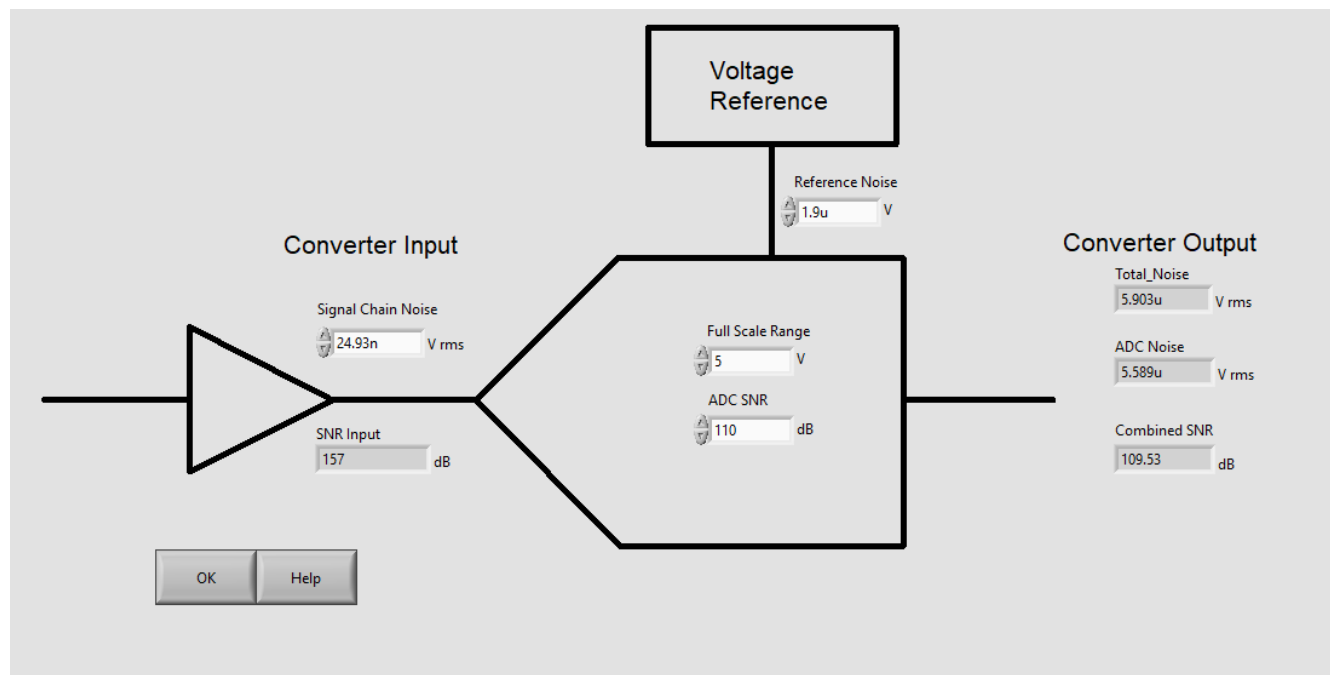


图 2-12. 方案 4 噪声性能

3 设计方案比较

表 3-1 显示了前面所述的四个方案之间的比较情况。客户可以为特定应用选择前述任何方案。

表 3-1. 方案比较

方案配置	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
ADC 器件	ADS9224R × 1	ADS8881 × 2	ADS8900B × 2	ADS127L21 × 2
ADC 分辨率和速度	16 位 3MSPS	18 位 1MSPS	20 位 1MSPS	24 位 1.365MSPS
ADC 电源	AVDD = 5V 典型值 (范围 : 4.5V 至 5.5V) DVDD = 3.3V 典型值 (范围 : 1.65V 至 5.5V)	AVDD = 3V 典型值 (范围 : 2.7V 至 3.6V) DVDD = 1.8V 典型值 (范围 : 1.65V 至 3.6V)	AVDD = 5V 典型值 (范围 : 3V 至 5.5V) DVDD = 3V 典型值 (范围 : 1.65V 至 5.5V)	AVDD = 5V 典型值 (范围 : 2.85V 至 5.5V) DVDD = 3V 典型值 (范围 : 1.65V 至 5.5V)
REF 范围	4.096V	2.5V 至 5V	2.5V 至 AVDD-0.3V	AVDD
REF 器件	内部	REF7050	REF7050	REF7050
前端运算放大器	THS4552	THS4551 × 2	THS4551 × 2	THS4551 × 2
前端运算放大器电源	2.7V 至 5.4V	2.7V 至 5.4V	2.7V 至 5.4V	2.7V 至 5.4V
ADC 尺寸和封装	32 引脚 VQFN (5mm X 5mm)	10 引脚 VSON (3mm X 3mm) 或 10 引脚 VSSOP (3mm X 3mm)	24 引脚 VQFN (4mm X 4mm)	20 引脚 QFN (3mm X 3mm)
有源元件的数量	2	5	5	5
SNR (来自数据表)	94dB	100dB	104.5dB	110dB
噪声 (uV)	8.207	8.286	7.030	5.903

4 总结

根据前面的仿真结果和方案比较，这四个方案各具优势。方案 1 适用于手持式和便携式超声波机器。方案 2 适用于一般超声波机器。方案 3 和方案 4 各自具有高 SNR 和动态范围，适用于高端超声波机器。工程师可以根据具体用例决定要使用哪种设计方案。

5 参考文献

- 德州仪器 (TI)，[适用于超声波 CW 多普勒的高分辨率、高 SNR 的真实原始数据转换参考设计](#)，设计指南。
- 德州仪器 (TI)，[使用 ADS92x4R 在超声波系统中进行连续波 \(CW\) 信号调节](#)，应用手册。

重要声明和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2024，德州仪器 (TI) 公司