

# 电容式触控应用中的灵敏度、**SNR** 和设计裕度

Walter Schnoor, Yiding Luo

MSP FRAM MCU Applications

## 摘要

本应用报告介绍了灵敏度、信噪比 (SNR) 和设计裕度的基本概念，随后介绍了如何使用这些概念来评估采用 CapTIvate™ 触控感应 MCU 构建而成的电容式触控应用的可靠性和稳健性。

## 内容

|     |                                         |    |
|-----|-----------------------------------------|----|
| 1   | 概述 .....                                | 3  |
| 1.1 | 设计目标 .....                              | 3  |
| 1.2 | 设计人员面临的两难问题 .....                       | 3  |
| 2   | 建议开发人员执行的操作 .....                       | 4  |
| 2.1 | 执行 SNR 和设计裕度测试 .....                    | 4  |
| 3   | 术语 .....                                | 6  |
| 3.1 | 信号 (S) .....                            | 6  |
| 3.2 | 噪声 (N) .....                            | 7  |
| 3.3 | 阈值 (灵敏度) (Th) .....                     | 8  |
| 3.4 | 设计裕度 .....                              | 9  |
| 3.5 | 信噪比 (SNR) .....                         | 10 |
| 3.6 | 建议 .....                                | 11 |
| 4   | CapTIvate 器件性能 .....                    | 11 |
| 4.1 | 最小建议值 .....                             | 11 |
| 4.2 | CapTIvate 器件 SNR .....                  | 12 |
| 5   | 解读结果 .....                              | 13 |
| 5.1 | 解读建议 .....                              | 13 |
| 5.2 | 检查其他结果 .....                            | 13 |
| 6   | 术语的应用 .....                             | 15 |
| 6.1 | 使用 7.5 mm 镀层时的计数和变化百分比分析，建议 = 较差 .....  | 15 |
| 6.2 | 使用 1.5 mm 镀层时的计数和变化百分比分析，建议 = 合理 .....  | 16 |
| 6.3 | 计数和变化百分比分析 (1.5 mm 镀层与 7.5 mm 镀层) ..... | 18 |
| 6.4 | 后处理和采样率的影响 .....                        | 18 |
| 7   | 总结 .....                                | 18 |

## 附图目录

|    |                               |    |
|----|-------------------------------|----|
| 1  | 执行测试前的 SNR 视图 .....           | 4  |
| 2  | 选择选项 .....                    | 5  |
| 3  | 执行测试后的 SNR 视图 .....           | 5  |
| 4  | 结果 .....                      | 6  |
| 5  | 信号术语 .....                    | 7  |
| 6  | 噪声术语 .....                    | 8  |
| 7  | 阈值术语 .....                    | 9  |
| 8  | 设计裕度术语 .....                  | 10 |
| 9  | CapTIvate SNR 和设计裕度建议工具 ..... | 14 |
| 10 | 使用 7.5 mm 镀层时的计数分析 .....      | 15 |
| 11 | 使用 7.5 mm 镀层时的变化百分比分析 .....   | 16 |

|    |                             |    |
|----|-----------------------------|----|
| 12 | 使用 1.5 mm 镀层时的计数分析 .....    | 17 |
| 13 | 使用 1.5 mm 镀层时的变化百分比分析 ..... | 17 |

# 附表目录

|   |                            |    |
|---|----------------------------|----|
| 1 | 计算信号的示例 .....              | 6  |
| 2 | 建议逻辑 .....                 | 11 |
| 3 | 最小建议参数值公式 .....            | 11 |
| 4 | CapTivate 最小建议设计裕度 .....   | 12 |
| 5 | CapTivate 器件 SNR.....      | 12 |
| 6 | 1.5 mm 镀层与 7.5 mm 镀层 ..... | 18 |

## 商标

CapTivate is a trademark of Texas Instruments.  
All other trademarks are the property of their respective owners.

## 1 概述

电容式触控感应是指定期监控感应电极的电容随时间的变化情况，并确定这些变化是由用户触摸还是某些其他非触摸现象导致的过程。此过程会定期执行电容数字转换以获得一些数字值，这些数字值代表感应电极随时间变化的电容。后处理算法会解读测量结果，并区分它们是真正的触摸或接近检测，还是长期的漂移和背景噪声。

电容式触控界面的设计人员一定要理解灵敏度、信噪比 (SNR) 和设计裕度的基本概念，更重要的是了解如何利用这些指标来确保电容式触控解决方案可靠、稳健。本文档概述了这些与电容式触控感应相关的性能指标，并重点介绍了如何评估使用 CapTIvate MCU 构建而成的电容式触控解决方案的可靠性和稳健性。

### 1.1 设计目标

电容式触控设计工程师的主要目标是开发一个符合以下要求的系统：

- 能够满足应用的功能需求
- 可以顺利集成到整个产品或父系统中
- 成本经过优化
- 可靠
- 稳健

在产品开发过程中，设计人员最关注的通常是前三个目标，在完成大部分工作并开始资质审核阶段时，才会关注后两个目标（可靠性和稳健性）。本文档重点介绍后两个目标，但不将它们视为需要在达成其他目标之后完成的独立活动。而是应在整个设计和开发阶段评估这些目标。

#### 1.1.1 可靠性

可靠性是指系统在其整个预期寿命内，在预期条件下正常工作的能力。对于在其预期条件下工作的电容式触控界面，这通常意味着：

- 正确检测所有的真正触摸和接近事件
- 拒绝由于噪声、环境变化或某些其他因素而导致的虚假触摸和接近事件

#### 1.1.2 稳健性

稳健性是指即使系统在非指定工作条件下使用，仍然正常运行的能力。例如，如果某个产品能够在其预期温度范围内正常运行，则表示该产品可靠。但如果产品即使在预期温度范围以外也能够正常运行，则被视为可靠且稳健。同样，如果在符合运作条件的住宅环境中或者在超出运作条件的更恶劣商业环境或工业环境中，电容式触控界面都能够正常运行，则被视为稳健。这是电容式触控界面的一种重要特征，原因有两个：

- 由于电容式感应中的信号电平较低，因此通常需要牺牲一定程度的稳健性来换取最佳的性能（例如最长的接近检测范围、最快的响应时间或最高的分辨率）。
- 通常无法测试甚至预测最终用户尝试使用产品的所有可能方式和环境。

### 1.2 设计人员面临的两难问题

要尽可能实现最佳性能，有时需要牺牲一定程度的稳健性，而且很难（甚至不可能）预测或测试最终用户使用产品的所有方式，因此电容式触控设计人员通常需要做出一一些重要决策才能实现所有相互矛盾的设计目标（功能、集成、成本、可靠性、稳健性）。归根结底，性能与稳健性之间的平衡因产品类型和销售市场而异。

为帮助设计人员有效地平衡这两个关键因素，本文档提供了一组有用的术语，便于他们更好地理解可靠性和稳健性。此外，本文档还介绍了使用 CapTIvate 技术的电容式触控应用的可靠性和稳健性评估流程。

## 2 建议开发人员执行的操作

TI 建议所有使用 CapTlvate 的电容式触控设计人员在开发和原型设计阶段，按照此流程来评估电容式触控实施方案的可靠性和稳健性，然后再从原型设计过渡到大规模生产。

### 2.1 执行 SNR 和设计裕度测试

在原型设计阶段，使用 [CapTlvate 设计中心](#) 开发工具测量应用中每个触控传感器的 SNR 和设计裕度。必须执行此操作，以确定是否有足够的设计裕度来限制大规模生产版本中的虚假触摸检测可能性。当执行此测试时，测试环境必须尽可能接近最终产品的预期使用环境。这意味着在测量期间，应当让电容式触控传感器暴露在产品运行时可能存在的所有噪声源中。例如，如果系统具有电机、无线电或者其他内部或外部噪声源，则应在这些噪声源存在并且正在发出噪声的情况下测量 SNR 和检查设计裕度。

注： 1.80.00.00 版或更高版本的 CapTlvate 设计中心包含最新的 SNR 和设计裕度分析 功能。

注： 此流程假设用户比较熟悉 CapTlvate 设计中心工具和 CapTlvate 软件库。如果并非如此，请在尝试测量 SNR 之前学习[入门讲座](#)。

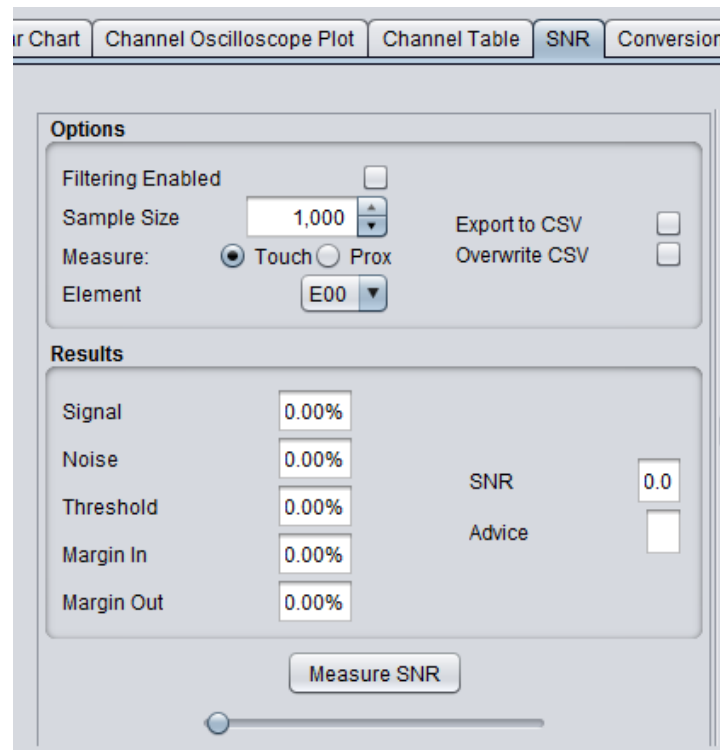


图 1. 执行测试前的 SNR 视图

1. 使用 [CAPTIVATE-PGMR](#) 调试工具将您的测试硬件连接到正在运行 [CapTlvate 设计中心](#) 的主机。为目标应用和 CapTlvate 设计中心配置 UART 或 BULK\_I2C 通信。将被测 MCU 的所选串行接口（UART 或 I2C）连接到 CAPTIVATE-PGMR。请参阅《[CapTlvate 技术指南](#)》，了解有关如何将信号连接到 CAPTIVATE-PGMR 的信息。在 CapTlvate 设计中心中，打开“Communications”菜单并选择“Connect”。如果能够在 CapTlvate 设计中心视图中看到传感器和元件数据，则表明您建立了有效的连接。
2. 建立通信之后，双击 CapTlvate 设计中心屏幕上的传感器定制器并选择“SNR”选项卡，以打开待测传感器的定制器。此时会出现一个空白的 SNR 屏幕（请参阅图 1）。
3. 在执行测试之前，设置所需的滤波、样本大小、阈值、要测试的元件以及文件选项。除非需要分析未过

滤的数据，否则请启用滤波，以便 SNR 结果基于正常使用时的后处理数据。TI 建议使用 1000 个样本来获得在统计方面具有重要意义的数据集。您可以使用 CSV 记录选项来捕获所有测试样本，以便必要时在其他工具中进行分析。

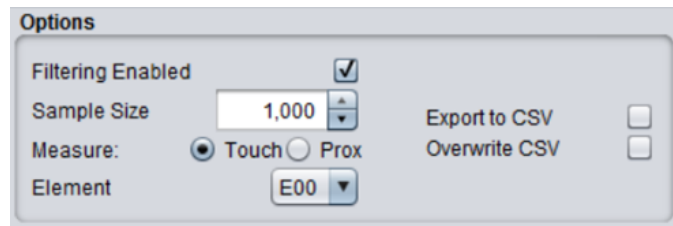


图 2. 选择选项

4. 选择所需的选项之后，选择“Measure SNR”按钮。一个对话框会出现，要求您触摸正在接受测试的传感器。此时系统会收集第一个数据集，以确定触控信号电平。收集了触控数据集之后，此对话框会要求您停止触摸按钮，以测量传感器的空闲噪声。
5. 收集了触控和非触控数据集之后，此工具会计算信号、噪声、阈值、裕度（输入）( $M_{in}$ )、裕度（输出）( $M_{out}$ ) 和 SNR。此工具还会提供关于设计稳健性的建议。

图 3 显示了 CAPTIVATE-BSWP 面板上按钮 1 的 SNR 测量结果示例。

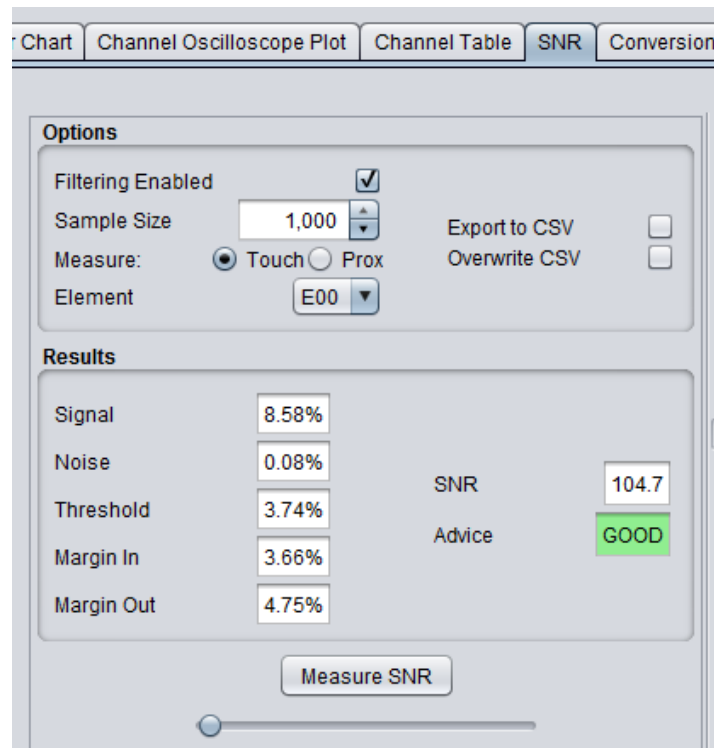


图 3. 执行测试后的 SNR 视图

### 3 术语

本节定义并说明了要更详细评估可靠性和稳健性时需要了解的关键术语。

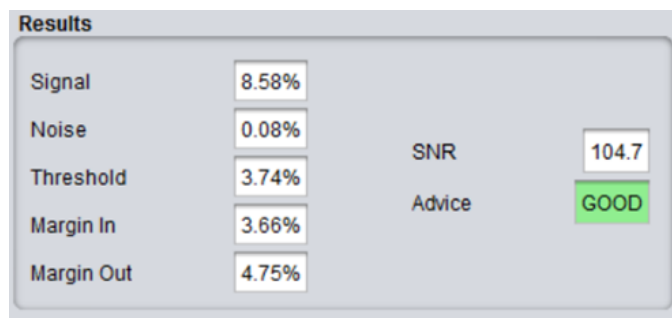


图 4. 结果

- 信号 (S)
- 噪声 (N)
- 阈值 (Th)
- 裕度 (输入) (Min)
- 裕度 (输出) (Mout)
- SNR (信噪比)
- 建议

注：电容变化百分比：为分析电容式触控 SNR 和设计裕度而选择的单位是电容变化百分比。电容式触控感应是通过测量现有但未知的电极电容随时间的相对变化而得出的。因此，用变化百分比来衡量是最直接的。这一视角的另一个好处是完全摆脱了对转换设置的依赖。过滤的计数和 LTA 值可能因转换设置和其他因素而异，但电容变化百分比取决于电气硬件 (PCB) 和机械硬件 (镀层材料)。因此，电容变化百分比可以用于除比值 (例如 SNR) 以外的所有参数。对于给定的过滤计数、LTA 和转换增益值，可以轻松使用公式 1 中的关系计算出电容变化百分比。

$$\Delta C_x = \frac{\text{Conversion\_Gain}}{\text{Count}} - \frac{\text{Conversion\_Gain}}{\text{LTA}} \times 100\% \quad (1)$$

#### 3.1 信号 (S)

要计算信噪比，首先需要定义信号和噪声。在电容式触控应用中，信号被定义为触摸或接近事件导致感应电极的电容发生的平均变化。例如，考虑一个带底座的自电容式感应电极，即非触控寄生电容  $C_p$ 。如果除了  $C_p$  以外还对感应网络应用了触控电容  $C_t$ ，则总电极电容  $C_x = C_p + C_t$ 。在这种情况下，表示为非触控电容百分比的电容变化将是  $C_t$  除以  $C_p$  所得的商。表 1 显示了一个简单的示例。

表 1. 计算信号的示例

| 参数   | 符号            | 值                                               |
|------|---------------|-------------------------------------------------|
| 寄生电容 | $C_p$         | 20 pF                                           |
| 触控电容 | $C_t$         | 1 pF                                            |
| 信号   | $S = C_t/C_p$ | $(1 \text{ pF}/20 \text{ pF}) \times 100 = 5\%$ |

注：在互电容式感应中，触控预计可减小电极电容，因此变化百分比显示为负。

在自电容式感应中，触控预计可增大电极电容，因此变化百分比显示为正。有关自电容和互电容的更多信息，请参阅《CapTivate 技术指南》。

图 5 按电容变化百分比显示了触控和非触控条件下的自模式按钮测量结果。信号被定义为触摸事件导致的电容变化百分比（请参阅图中的红色“信号”行）。

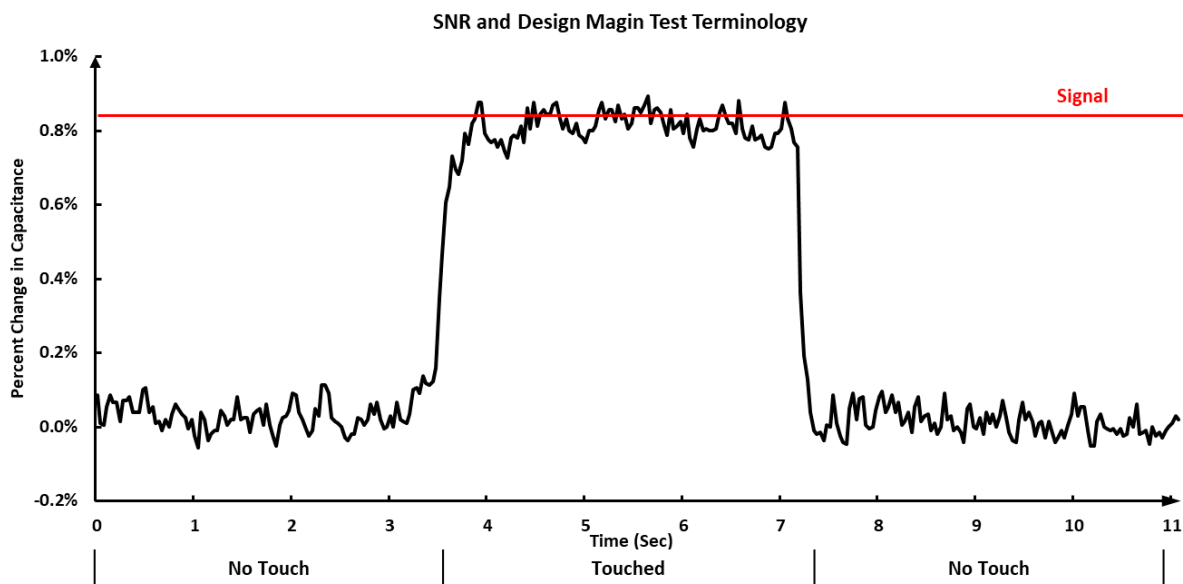


图 5. 信号术语

需要从信号定义中了解的一个基本概念是，信号不但会受到触控电容的影响，还会受到电极寄生电容的影响。这是合理的——在 20 pF 的电容器中测量 1 pF 的变化 (5%) 要比在 100 pF 的电容器中测量 1 pF 的变化 (1%) 容易。因此，哪些因素会影响  $C_p$  和  $C_t$ ？ $C_p$  主要取决于印刷电路板的布局，包括电极的尺寸以及此电极与附近的导体（例如地面）的接近程度。 $C_t$  取决于镀层厚度和介电常数以及感应电极相对于触摸电极的手指大小。有关如何优化这些参数的详细信息，请参阅《CapTivate 技术指南》设计一章中的最佳实践部分。

注：在使用 CapTivate MCU 开发的过程中测量物理电极时，可以使用 CapTivate 设计中心的 SNR 工具视图来测量以电容变化百分比表示的信号“S”。

### 3.2 噪声 (N)

现在已经定义了信号“S”，还必须定义噪声“N”。最高效的做法是像定义信号那样定义噪声，以便能够轻松比较这两个值（例如使用 SNR 分析）。这意味着系统中的噪声被定义为并非由真实触摸或接近事件导致电容发生的最大实测变化。同理，噪声水平“N”被定义为与真实触摸或接近事件的精确检测不相关、因此会对精确检测产生干扰的实测电容变化百分比。



电容式触控界面会受到多个噪声源的干扰，例如：

- （IC 产生的）片上本底噪声
- 外部传导或辐射射频噪声
- 电气快速瞬变或突发噪声
- 50/60 Hz 交流电源噪声

在噪声方面面临的挑战在于将所有可能的噪声源组合到一个噪声值中，以供 SNR 和设计裕度分析使用。

图 6 按电容变化百分比显示了触控和非触控条件下的自模式按钮测量结果。噪声被定义为系统噪声的总和和导致的电容变化百分比（请参阅图中蓝色的“噪声”行）。

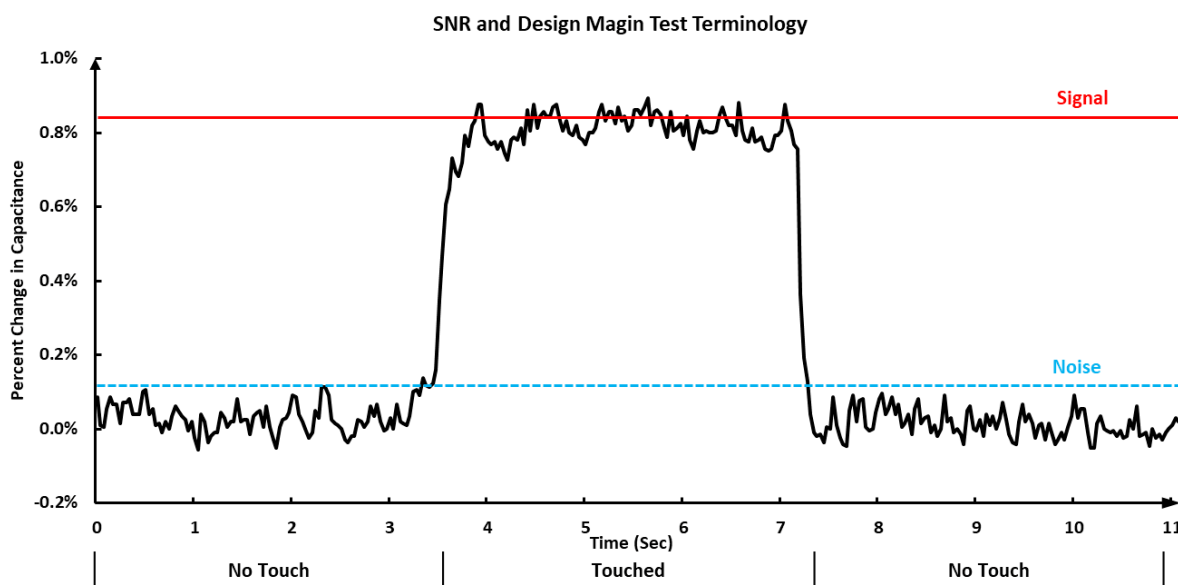


图 6. 噪声术语

注： 在使用 CapTivate MCU 开发的过程中测量物理电极时，可以利用 CapTivate 设计中心的 SNR 工具视图来测量以电容变化百分比表示的噪声水平“N”。

### 3.3 阈值（灵敏度）(Th)

灵敏度与电容式感应同义。不同的人对灵敏度会有不同的理解。为了让此分析更加清晰，本文档中明确使用灵敏度来描述对检测阈值进行的调优，单位是电容变化百分比。通过使用与信号和噪声相同的单位（电容变化百分比）来定义灵敏度，可以彻底摆脱对模拟前端配置的依赖，并能够轻松对值进行比较。

如 1 节中所述，触摸和接近检测报告基于特定的电容变化。用户在传感器调优选项卡中配置的检测阈值将决定在原始数据后处理期间，触发触摸或接近检测需要达到的变化幅度。例如，如果将应用的灵敏度级别设置为 5%，则除非电容的变化超过 5%，否则不会触发检测。

以这种方式定义灵敏度时（将其与检测阈值相关联），灵敏度就变成了一个调优属性，表明系统设计人员为电容式触控实施方案配置的灵敏程度。调优流程最终需要确定最优的检测阈值（并进而确定最优的灵敏度），以获得相对于信号和噪声的适当设计裕度。

在此 SNR 分析工具中，系统会基于用户在“Tunning”选项卡中选择的触摸/接近阈值参数计算得出阈值结果，结果单位为电容变化百分比。



图 7 按电容变化百分比显示了触控和非触控条件下的自模式按钮测量结果。用户配置的阈值被定义为电容变化百分比（请参阅图中绿色的“阈值”行）。

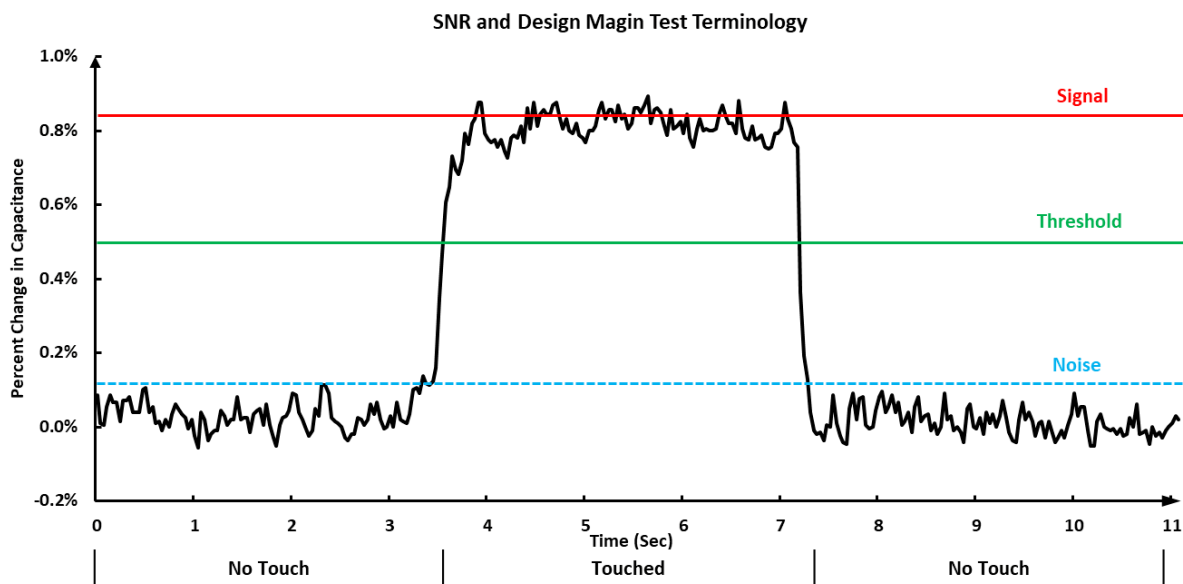


图 7. 阈值术语

注：当降低触摸/接近阈值（更低的电容变化百分比）时，应用对触摸或接近的灵敏度会升高。接近应用被视为高灵敏度，因为这种应用会尝试使用非常低的检测阈值 (Th) 来检测非常小的信号（电容变化非常小）。当提高应用的灵敏度时，可实现的 SNR 和设计裕度通常会降低。

### 3.4 设计裕度

尽管 SNR 是一个相对于噪声水平的有效信号电平指标，但它并不是在设计期间为实现可靠性和稳健性而需要考虑的唯一指标。在这种情况下，还要进行设计裕度分析。对于基于阈值的系统来说，从基于阈值的数字逻辑噪声裕度分析中借鉴而来的设计裕度非常有用，因为它能够解决 SNR 的主要局限。设计裕度分析会考虑检测阈值，并分析关闭状态和打开状态的裕度。随后的几节将介绍一些参数和它们的重要性。与 SNR 不同的是，设计裕度参数在多个测量之间的重复度非常高。

#### 3.4.1 虚假检测裕度 ( $M_{in}$ )

虚假检测裕度（即  $M_{in}$ ）是指检测阈值与最高噪声水平之间的裕度（请参阅公式 2、公式 3 和图 8）。

自模式

$$M_{in} = Th - N \quad (2)$$

互模式

$$M_{in} = N - Th \quad (3)$$

此参数受到人们的特别关注，因为它表明了防范虚假触摸检测方面存在多大的裕度。例如，如果  $Th = 1\%$ 、 $N = 0.5\%$ ，则虚假检测裕度为 0.5% 的变化幅度。由于裕度是阈值的 50%，这意味着噪声水平必须翻一倍才会触发虚假触摸检测。

### 3.4.2 检测裕度 ( $M_{out}$ )

检测裕度与虚假检测裕度正好相反。检测裕度假设出现了触控条件，它是指图 8 中显示的最低信号值  $S_{low}$ （或许是由于触摸或接近时存在噪声而导致）与检测阈值的差（请参阅公式 4、公式 5 和图 8）。此裕度表明了系统在摆脱检测方面有多稳定，换句话说，系统应当与信号和阈值之间保持足够的裕度，这样当检测到用户触摸时，噪声才不会导致信号摆脱检测。

自模式

$$M_{out} = S_{low} - Th \quad (4)$$

互模式

$$M_{out} = Th - S_{low} \quad (5)$$

例如，考虑这样一种情况：在触摸期间存在噪声，触摸信号“S”不恒定，但最小值为 1.3%，检测阈值和上一个示例一样被设置为 1%。在这种情况下，最小值将是  $1.3\% - 1.0\% = 0.3\%$ 。此参数反映了触摸或接近检测状态有多稳定。对于给定的信号，如果将检测阈值设置得太高，则最小值会减小。如果检测阈值减小得过多，当信号中存在额外的噪声时，触摸期间将难以在不切入和切出检测的情况下可靠地检测触摸。

图 8 按电容变化百分比显示了触控和非触控条件下的自模式按钮测量结果，“裕度（输入）”和“裕度（输出）”也被定义为电容变化百分比，如图中的蓝色区域所示。

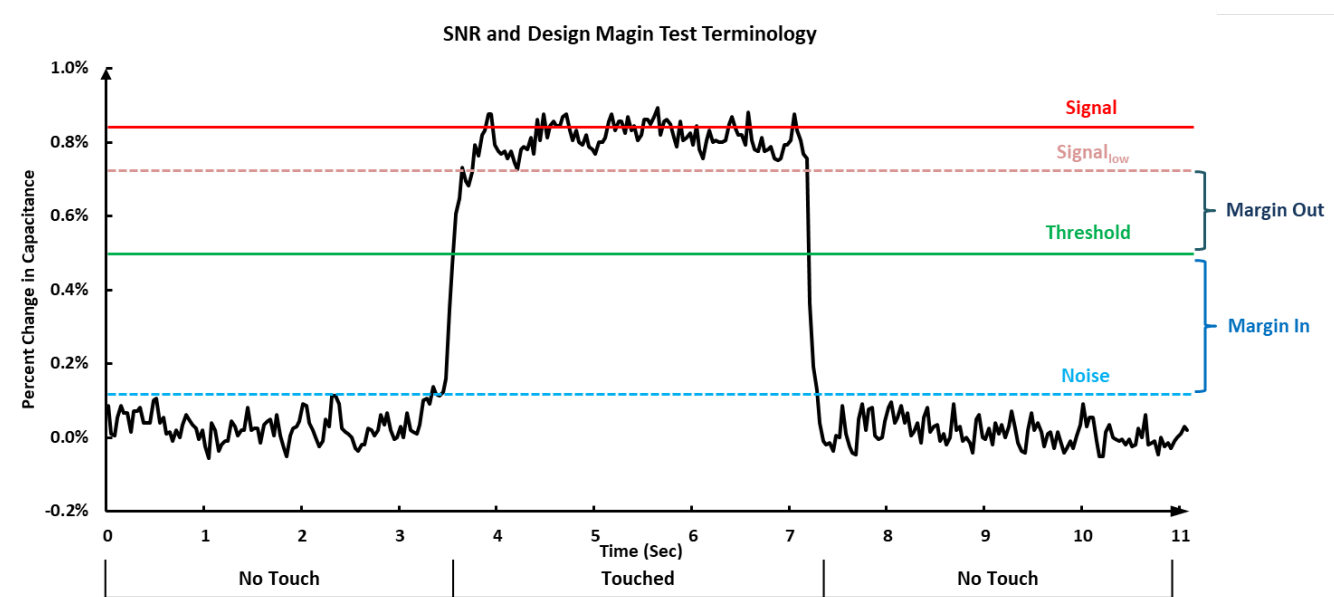


图 8. 设计裕度术语

### 3.5 信噪比 (SNR)

信噪比 (SNR) 指信号“S”与噪声“N”之比。当 SNR 值大于 1 时，意味着信号幅度大于噪声幅度。当 SNR 值小于 1 时，意味着噪声幅度大于信号幅度。比较信号幅度（由于触摸而导致的实测电容变化百分比）与本底噪声（由于除触摸以外的其他因素而导致的实测电容变化百分比）时，此参数非常有用。公式 6 显示了 SNR 公式。

$$SNR = \frac{S}{N} \quad (6)$$

这种 SNR 用法与传统的 SNR 用法之间存在一些差异。

首先，SNR 以往是指平均功率的比值（平均信号功率与平均噪声功率的比值）。对于电容式感应来说，此比值没有多大用处，因为电容式感应关注的是长期阶跃响应信号，而不是随时间变化的连续信号。事实上，可以将噪声视为一个随时间变化、具有频率分量的信号，不过要以这种方式看待持续触摸信号就要困难多了。

其次，SNR 以往以基于对数刻度的分贝 (dB) 形式表示，这样就可以比较非常宽泛的动态范围内的值。由于电容式触控信号值通常处于一个数量级或两个噪声水平以内，因此使用对数刻度几乎没有优势；而且与使用标准刻度相比，使用对数刻度通常更加难以比较 SNR 值。因此，本文档对 SNR 使用简单的比值而不是分贝值。但如果需要使用分贝等效值，正确的计算方法是将“S”除以“N”并以 10 为底求出对数，然后再乘以 20（请参阅公式 7）。使用 20 作为倍数是因为“S”和“N”表示的是幅度，而不是功率。

$$\text{SNR} = 20 \log_{10} \left( \frac{S}{N} \right) \quad (7)$$

当使用 CapTivate 设计中心测量 SNR 时，您可能会发现在多次执行测试时难以获得一致的值。这通常是因为在很多 CapTivate 设置中，噪声值在低分辨率测量中被量化，因此只能是一个或两个计数。因此，如果一次 SNR 测量取得的噪声值为 1，下一次测量取得的噪声值为 2，则即使传感器的可靠性和稳健性并没有发生多大变化，SNR 也会降低 50%。这是在低分辨率电容式感应应用中将 SNR 用作分析工具的一个局限。由于观察到 SNR 发生了变化，因此还需要考虑其他指标，例如设计裕度。

### 3.6 建议

CapTivate 设计中心 SNR 和设计裕度测试工具会将所有的上述实测参数与器件的最小建议值进行比较，从而针对设计裕度是否合理提供建议。

表 2 显示了此工具在确定建议结果时采用的逻辑。要了解最小的建议值，请参阅 4 节。

注：CapTivate 设计中心 SNR 工具假设产品能够在低至 0°C 的温度下运行，并在 25°C 的正常室温下执行特性评估流程。要在不同的工作温度或特性评估温度下分析系统，您可以参阅表 4，也可以使用 CapTivate SNR 和设计裕度建议工具。

表 2. 建议逻辑

|                                             |         |
|---------------------------------------------|---------|
| 阈值   < 最小建议阈值<br>或<br>裕度 (输入) < 最小建议裕度 (输入) | 建议 = 较差 |
| 否则                                          | 建议 = 合理 |

## 4 CapTivate 器件性能

### 4.1 最小建议值

表 4 为采用第一代和第二代 CapTivate 技术的器件显示了各种工作温度下的最小建议阈值和最小建议裕度（输入），并且我们假设用户在室温下对系统进行了调优。

表 3 显示了用于在各种工作温度和特性评估流程温度下计算这些参数的公式。将预期的最大器件本底噪声与预定义的安全系数相加，即可计算出最小建议阈值。得出最小建议阈值与典型本底噪声值的差，可以计算出最小建议裕度（输入）值。

表 3. 最小建议参数值公式

|             |   |                  |   |                         |
|-------------|---|------------------|---|-------------------------|
| 最小建议阈值      | = | 工作温度下的预期最大器件本底噪声 | + | 安全系数                    |
| 最小建议裕度 (输入) | = | 工作温度下的预期最大器件本底噪声 | - | 特性评估温度下的典型器件本底噪声 + 安全系数 |

示例：某个使用 MSP430FR2633（第一代）的产品能够在低至 0°C 的温度下运行，并在 25°C 的正常室温下执行特性评估流程。

最小建议阈值 = 0.8% + 0.1% = 0.9%

最小建议裕度（输入） = 0.8% - 0.07% + 0.1% = 0.83%

表 4. CapTivate 最小建议设计裕度

| CapTivate 技术 | 环境温度  | 典型器件本底噪声 | 预期最大器件本底噪声 | 安全系数 | 最小建议阈值 | 最小建议裕度（输入） |
|--------------|-------|----------|------------|------|--------|------------|
| 第一代          | 25°C  | 0.07%    | 0.5%       | 0.1% | 0.6%   | 0.53%      |
|              | 0°C   | 0.09%    | 0.8%       |      | 0.9%   | 0.83%      |
|              | -40°C | 0.13%    | 1.3%       |      | 1.4%   | 1.33%      |
| 第二代          | 25°C  | 0.06%    | 0.2%       | 0.1% | 0.3%   | 0.24%      |
|              | -40°C | 0.09%    | 0.2%       |      | 0.3%   | 0.24%      |

各个装置的器件本底噪声可能有所不同，正如典型和最小 SNR 范围以及典型和最大本底噪声所示。分析应用时，TI 建议考虑最坏情况下的性能（最小 SNR 和最大本底噪声）。在提供建议时，SNR 工具会执行器件变化分析。器件本底噪声也与温度相关。对于 必须在低温环境中运行的应用，应当为其设计较高的裕度（输入）值，以适应较低温度下的较高噪声水平。

## 4.2 CapTivate 器件 SNR

表 5 为具有 0.5 pF 触控电容和 20 pF 电极寄生电容的示例用例列出了 CapTivate 器件的典型和最小 SNR 值。等效信号“S”等于 0.5 pF 除以 20 pF，即 2.5% 的电容变化。

表 5. CapTivate 器件 SNR

| CapTivate 技术 | 触控电容   | 电极（寄生）电容 | 信号   | 环境温度  | 典型 SNR | 预期最小 SNR |
|--------------|--------|----------|------|-------|--------|----------|
| 第一代          | 0.5 pF | 20 pF    | 2.5% | 25°C  | 36:1   | 5:1      |
|              | 0.5 pF | 20 pF    | 2.5% | 0°C   | 28:1   | 3.1:1    |
|              | 0.5 pF | 20 pF    | 2.5% | -40°C | 19:1   | 1.9:1    |
| 第二代          | 0.5 pF | 20 pF    | 2.5% | 25°C  | 42:1   | 13:1     |
|              | 0.5 pF | 20 pF    | 2.5% | -40°C | 28:1   | 13:1     |

注：SNR 值（特别是预期最小 SNR 值）是为了帮助开发应用而提供的，仅供参考。请参阅特定器件数据表，以了解指定的 SNR 值。

表 5 中 CapTivate 器件的 SNR 值是使用计数过滤器 β 3、LTA 过滤器 β 7 以及 167sps 的扫描频率进行特性评估和测试而得出的。

通过反推测试用例（2.5% 信号），可以从 SNR 参数推导出等效的典型和最大器件本底噪声（一个对于裕度分析非常有用的参数）。将信号除以 SNR 值，即可得出本底噪声。通过对噪声的 SNR 公式进行求解，即可得出这些值（请参阅公式 8）。

$$N = \frac{S}{\text{SNR}} \quad (8)$$

## 5 解读结果

完成 SNR 测试之后，可以使用 SNR 测试结果来分析被测传感器的可靠性和稳健性。

### 5.1 解读建议

CapTlvate 设计中心会对测得的设计裕度是否合理提供建议。

**建议：合理**

如果建议是“合理”，则表明所测试的应用具有安全的阈值设置和充足的虚假检测裕度 (Min)。

**建议：较差**

如果建议是“较差”，则表明应用具有非常低的设计裕度（输入）或非常低的阈值设置。

1. 检查“噪声”结果。如果高于典型值（0.02% 到 0.12%），则应分析系统，以确定是否存在噪声源。
2. 在依然能够检测到触摸事件的情况下，在“Tuning”选项卡中增大“Touch/Proximity Threshold”设置。再次或在多个装置上执行 SNR 测量测试。
3. 重复第 2 步。如果对器件的建议仍然是“较差”，则表明系统用于检测触摸或接近事件的“Touch/Proximity Threshold”太高，在这种情况下，必须修改硬件和/或机械设计以增大信号。

### 5.2 检查其他结果

3 节介绍了结果参数（信号、噪声、阈值、裕度 [输入]、裕度 [输出] 和 SNR）。要检查的最重要参数是阈值和裕度（输入），裕度（输入）是指在发生虚假检测之前可以容忍的额外噪声量。需要利用此裕度来防止增大的外部噪声或增大的器件噪声触发虚假检测。TI 建议使用大于表 4 中所示的最小建议裕度（输入）的裕度（输入）值。

---

**注：** CapTlvate 设计中心 SNR 工具假设产品能够在低至 0°C 的温度下运行，并在 25°C 的正常室温下执行特性评估流程。要在不同的工作温度或特性评估温度下分析系统，您可以参阅表 4，也可以使用 [CapTlvate SNR](#) 和 [设计裕度建议工具](#)。

---

**示例：** 产品使用 MSP430FR2633 器件，设计人员希望在 25°C、0°C 和 -40°C 温度下执行设计裕度分析并在 25°C 温度下执行特性评估流程。来自 SNR 工具的阈值 (%) 为 1.13%，来自 SNR 工具的裕度（输入）值为 1.07%。图 9 显示了 CapTlvate SNR 和设计裕度建议工具在三种不同的工作温度下提供的建议结果。此工具根据系统的状况输出最小建议阈值、最小建议裕度（输入）和建议。

| Msp430 CapTivate SNR and Design Margin Advice Tool |                                                                               |              |
|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Step 1                                             | Please select what MSP430 device you use.                                     |              |
|                                                    | MSP430 Device:                                                                | MSP430FR2633 |
| Step 2                                             | Please select the temperature the product is designd to operate down to.      |              |
|                                                    | Product Operating Temperature:                                                | 25C          |
| Step 3                                             | Please select the temperature the product is characterized at. (Normally 25C) |              |
|                                                    | Characterization Temperature:                                                 | 25C          |
| Step 4                                             | Please enter the Threshold result from CapTivate Design Center SNR tool.      |              |
|                                                    | SNR Tool Threshold Value (%):                                                 | 1.13         |
| Step 5                                             | Please enter the Margin In result from CapTivate Design Center SNR tool.      |              |
|                                                    | SNR Tool Margin In Value (%):                                                 | 1.07         |
| Minimum Recommended                                | Minimum Recommended Threshold (%)                                             | 0.6          |
|                                                    | Minimum Recommended Margin In (%)                                             | 0.53         |
| Advice                                             | Good                                                                          |              |

| Msp430 CapTivate SNR and Design Margin Advice Tool |                                                                               |              |
|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Step 1                                             | Please select what MSP430 device you use.                                     |              |
|                                                    | MSP430 Device:                                                                | MSP430FR2633 |
| Step 2                                             | Please select the temperature the product is designd to operate down to.      |              |
|                                                    | Product Operating Temperature:                                                | 0C           |
| Step 3                                             | Please select the temperature the product is characterized at. (Normally 25C) |              |
|                                                    | Characterization Temperature:                                                 | 25C          |
| Step 4                                             | Please enter the Threshold result from CapTivate Design Center SNR tool.      |              |
|                                                    | SNR Tool Threshold Value (%):                                                 | 1.13         |
| Step 5                                             | Please enter the Margin In result from CapTivate Design Center SNR tool.      |              |
|                                                    | SNR Tool Margin In Value (%):                                                 | 1.07         |
| Minimum Recommended                                | Minimum Recommended Threshold (%)                                             | 0.9          |
|                                                    | Minimum Recommended Margin In (%)                                             | 0.83         |
| Advice                                             | Good                                                                          |              |

| Msp430 CapTivate SNR and Design Margin Advice Tool |                                                                               |              |
|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Step 1                                             | Please select what MSP430 device you use.                                     |              |
|                                                    | MSP430 Device:                                                                | MSP430FR2633 |
| Step 2                                             | Please select the temperature the product is designd to operate down to.      |              |
|                                                    | Product Operating Temperature:                                                | -40C         |
| Step 3                                             | Please select the temperature the product is characterized at. (Normally 25C) |              |
|                                                    | Characterization Temperature:                                                 | 25C          |
| Step 4                                             | Please enter the Threshold result from CapTivate Design Center SNR tool.      |              |
|                                                    | SNR Tool Threshold Value (%):                                                 | 1.13         |
| Step 5                                             | Please enter the Margin In result from CapTivate Design Center SNR tool.      |              |
|                                                    | SNR Tool Margin In Value (%):                                                 | 1.07         |
| Minimum Recommended                                | Minimum Recommended Threshold (%)                                             | 1.4          |
|                                                    | Minimum Recommended Margin In (%)                                             | 1.33         |
| Advice                                             | Poor                                                                          |              |

图 9. CapTivate SNR 和设计裕度建议工具



## 6 术语的应用

本节会将前文讨论的参数应用于应用用例。在该示例中，测试硬件是采用了 **CAPTIVATE-BSWP** 传感器 PCB 的 **CAPTIVATE-FR2633** MCU PCB。此传感器板是为 1.5 mm 的镀层而设计的。为了同时显示“合理”和“较差”建议示例，在现有的 1.5 mm 镀层材料上额外涂了一层 6 mm 的镀层材料，将镀层的总厚度增大到 7.5 mm。与 1.5 mm 的镀层相比，7.5 mm 的镀层会减小触控电容 ( $C_t$ )，从而减小信号和设计裕度，并导致 SNR 分析工具给出“较差”的建议。

### 6.1 使用 7.5 mm 镀层时的计数和变化百分比分析，建议 = 较差

由于电容式触控感应流程涉及到电容随时间的变化，因此电容式触控软件必须维持一个代表非触控电容的参考值。此参考值是一个缓慢变化的平均值，被称为长期平均值 (long-term average, LTA)。每个新样本都会与这个变化的平均值进行比较，以确定是否存在触摸。**图 10** 显示了当发生触摸并随即解除触摸时，具有 7.5 mm 镀层的测试硬件的计数和长期平均值。请注意，计数值（转换结果）会从大约 1410 的长期平均值降至大约 1264（大约 146 个计数的变化）。这次的特殊测量中还存在一些噪声。

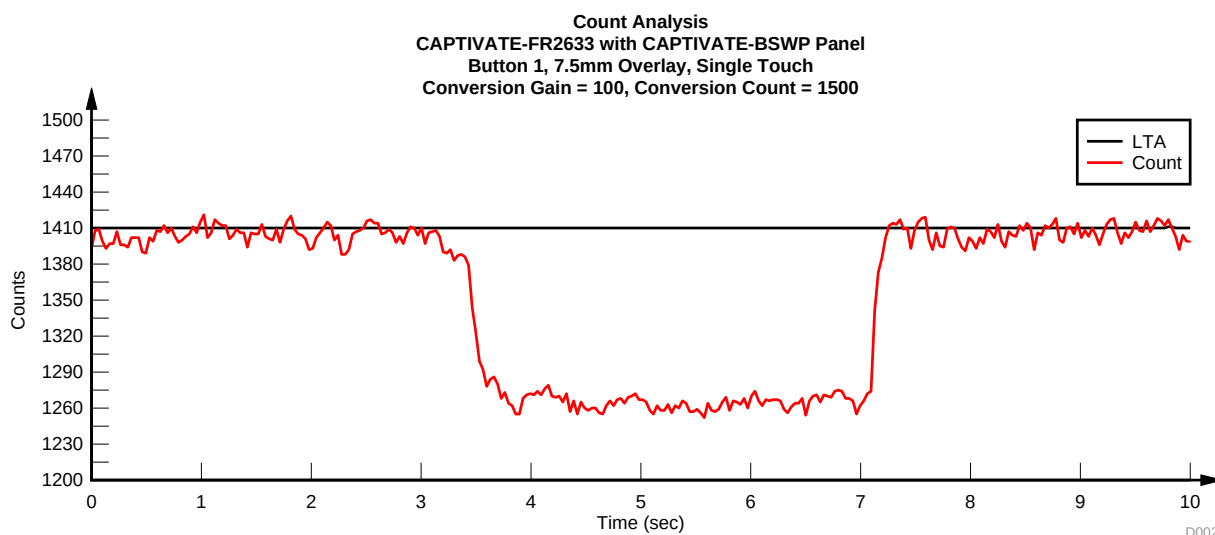


图 10. 使用 7.5 mm 镀层时的计数分析

要为此数据集确定信号“S”和噪声“N”参数，必须将计数和 LTA 值转换为电容变化百分比形式。之所以需要这样做，是因为 CapTivate 模拟前端具有可编程的偏移功能，能够放大电容的细微变化。由触摸导致计数从 1410 变为 1264 意味着计数发生了 -10% 的变化。但这一变化并不是电容的变化。计数的变化看起来大于电容的变化，这是因为在转换时应用了偏移，以去除电极的部分寄生电容 ( $C_p$ ) 的影响。**公式 9** 显示了计数与变化百分比之间的关系。

$$\Delta C_x = \left( \frac{\text{Conversion\_Gain}}{\text{Count}} - \frac{\text{Conversion\_Gain}}{\text{LTA}} \right) \times 100\% \quad (9)$$

在这个公式中，Conversion\_Gain 参数值取自于 CapTivate 设计中心，LTA 和计数取自于数据集。通过对上一个示例中的 LTA 和计数值应用此公式，得出了 **图 11** 中的结果。

示例：电容的信号变化百分比 =  $[(100/1264) - (100/1410)] \times 100\% = 0.82\%$ 。请注意，计数减少表示电容增大，因此触摸所导致的变化方向会出现反转。



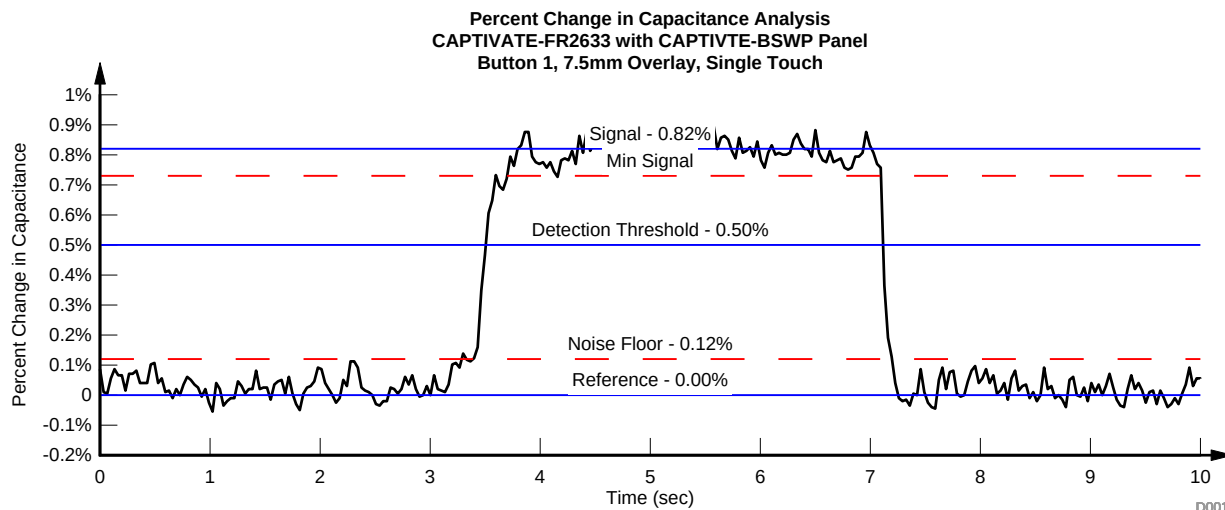


图 11. 使用 7.5 mm 镀层时的变化百分比分析

图 11 中应用了公式 9，明确说明了电极的电容如何随着触摸而变化。在此图中可以看出，触摸导致电容发生了 0.82% 的平均变化。还应注意，在该示例中，触摸方向的噪声水平高达 0.12%。这两个值分别提供了信号“S”和噪声“N”。现在可以为该示例计算 SNR。

$$SNR = \frac{S}{N} = \frac{0.82\%}{0.12\%} = 6.8:1 \quad (10)$$

得出了“S”、“N”和 SNR 之后，现在可以设置检测阈值并分析设计裕度。设计裕度可提供比 SNR 更丰富的电容式触控应用信息，因为它表明最高噪声水平与检测阈值之间的裕度。这样就可以深入了解虚假检测风险。除了 SNR 以外还需要考虑这一因素的原因是，如果由于某种原因将检测阈值设置为一个小于正常值的值，则 SNR 不会变化，但虚假检测风险会发生变化（因为本底噪声与检测阈值之间的差异变得更小了）。

图 11 表明阈值 (Th) = 0.5%。根据表 4，0°C 工作温度下的最小建议阈值是 0.9%。这意味着如果将该示例设计为在低至 0°C 的温度下运行，则 SNR 分析工具会给出“较差”的建议。

公式 11 计算了该示例中的 Min。在该示例中，0.38% 的 Min 也低于表 4 中所示的最小建议裕度（输入）0.83%。这意味着如果将该示例设计为在低至 0°C 的温度下运行，则 SNR 分析工具会给出“较差”的建议。

$$M_{in} = Th - N = 0.5\% - 0.12\% = 0.38\% \quad (11)$$

公式 12 计算了计数。这是触摸期间的最低变化百分比与检测阈值之间的差异。

$$M_{out} = S_{low} - Th = 0.73\% - 0.50\% = 0.23\% \quad (12)$$

## 6.2 使用 1.5 mm 镀层时的计数和变化百分比分析，建议 = 合理

6.1 节 中的示例使用了 CAPTIVATE-BSWP 感应面板，此面板是为 1.5 mm 的镀层而设计的，它的镀层厚度为 7.5 mm。该示例展示了较差的设计裕度和 SNR 情况。可通过两种方式提高此 SNR：

- 减小电极寄生电容  $C_p$
- 增大触控电容  $C_t$

减小镀层厚度会使触控电容  $C_t$  增大，这样的话，触摸导致的电容变化百分比会变得更加大。对于 1.5 mm 的镀层，计数现在的变化是  $1490 - 690 = 800$  个计数，信号“S”从 0.82% 的电容变化提高到非常理想的 7.8%（请参阅图 12 和图 13）。

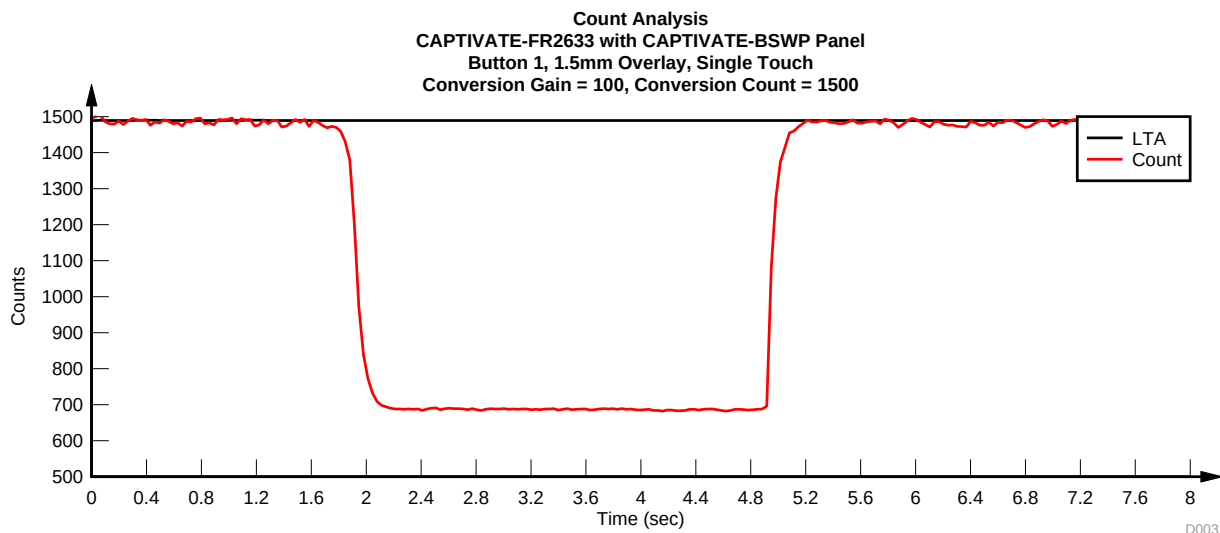


图 12. 使用 1.5 mm 镀层时的计数分析

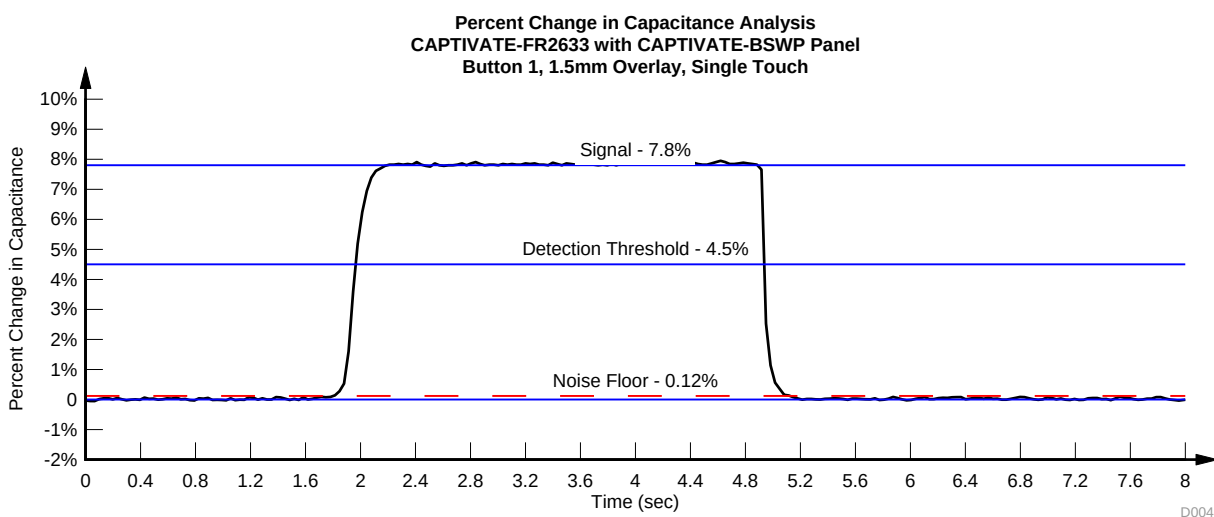


图 13. 使用 1.5 mm 镀层时的变化百分比分析

可以使用公式 13 计算出此配置的 SNR。

$$\text{SNR} = \frac{S}{N} = \frac{7.8\%}{0.12\%} = 65:1 \quad (13)$$

图 13 表明阈值 (Th) = 4.5%。根据表 4，0°C 工作温度下的最小建议阈值是 0.9%，此设计的阈值 (Th) 是最小建议值的 5 倍。这意味着如果将该示例设计为在低至 0°C 的温度下运行，则 SNR 分析工具会给出“合理”的建议。

公式 14 计算了该示例中的 Min。在该示例中，4.38% 的 Min 也是表 4 中所示的最小建议裕度（输入）(Min) 0.83% 的 5 倍。这意味着如果将该示例设计为在低至 0°C 的温度下运行，则 SNR 分析工具会给出“合理”的建议。

$$M_{\text{in}} = Th - N = 4.05\% - 0.012\% = 4.038\% \quad (14)$$

公式 15 计算了计数。这是触摸期间的最低变化百分比与检测阈值之间的差异。

$$M_{\text{out}} = S_{\text{low}} - Th = 7.07\% - 4.5\% = 3.2\% \quad (15)$$

这表明，将镀层厚度减小 5 倍可以将 SNR 提高将近 10 倍。

### 6.3 计数和变化百分比分析（1.5 mm 镀层与 7.5 mm 镀层）

表 6 显示了两种厚度不同但采用相同传感器面板的镀层之间的计数和变化百分比分析比较。

表 6. 1.5 mm 镀层与 7.5 mm 镀层

| 参数                  | 具有 1.5 mm 镀层的 CAPTIVATE-BSWP 面板的结果 (%) | 具有 7.5 mm 镀层的 CAPTIVATE-BSWP 面板的结果 (%) | 最小建议值 (%) |
|---------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|-----------|
| 信号 (S)              | 7.8                                    | 0.82                                   |           |
| 最小信号 ( $S_{low}$ )  | 7.7                                    | 0.73                                   |           |
| 噪声 (N)              | 0.12                                   | 0.12                                   |           |
| 阈值 (Th)             | 4.5                                    | 0.5                                    | 0.9       |
| 裕度（输入）( $M_{in}$ )  | 4.38                                   | 0.38                                   | 0.83      |
| 裕度（输出）( $M_{out}$ ) | 3.2                                    | 0.23                                   |           |
| 建议                  | 合理                                     | 较差                                     |           |

### 6.4 后处理和采样率的影响

必须注意的是，测得的噪声“N”会受到计数值过滤、LTA 跟踪速率和整体采样率的影响。在前面的示例中，使用了计数过滤器  $\beta$  1、LTA 过滤器  $\beta$  7 以及 30 个样本/秒 (sps) 的扫描频率。一般而言，增大计数过滤器  $\beta$  可以降低噪声水平（并因此提高 SNR）。增大计数过滤器  $\beta$  会导致计数信号的相位滞后变大。这样，当增大计数过滤器  $\beta$  时，最好也增大采样率，以维持所需的触摸响应时间。

## 7 总结

当设计电容式触控系统以提高可靠性时，应检查各个传感器的设计裕度，从而确保系统在所需的温度范围内运行或者某个装置存在高于典型水平的本底噪声时，设计能够承受可能遇到的更高噪声水平。为了进一步实现更高的稳健性，应当考虑最终客户在超出系统规格的情况下使用产品的方式，并在检查设计裕度时也将这些信息考虑在内。

请务必借助 CapTivate 设计中心中的 SNR 工具来轻松测量您的系统。

有关电容式触控设计最佳实践的更多信息，请参阅《CapTivate 技术指南》的“设计指南”一章。

## 修订历史记录

注：之前版本的页码可能与当前版本有所不同。

| Changes from August 18, 2018 to March 25, 2019                       | Page |
|----------------------------------------------------------------------|------|
| • 添加了作者 Yiding Luo.....                                              | 1    |
| • 更改了2.1 节执行 SNR 和设计裕度测试第一条注释中建议的 CapTlvate 设计中心版本 .....             | 4    |
| • 添加了图 2 选择选项 .....                                                  | 5    |
| • 向表 1 计算信号的示例“信号”行的“符号”列添加了“ $C_p/C_p$ ” .....                      | 6    |
| • 在3.1 节信号 (S) 的注释中添加了第二个段落 .....                                    | 6    |
| • 在3.1 节信号 (S) 中添加了图 5 信号术语及其之前的段落 .....                             | 7    |
| • 移动了3.2 节噪声 (N) 并添加了图 6 噪声术语 .....                                  | 7    |
| • 3.3 节阈值（灵敏度）(Th) 中添加了以“在此 SNR 分析工具中...”开头直到图 7 的段落，并更新了后面的注释 ..... | 8    |
| • 移动了3.4 节设计裕度.....                                                  | 9    |
| • 添加了图 8 设计裕度术语 .....                                                | 10   |
| • 添加了3.6 节建议.....                                                    | 11   |
| • 添加了4.1 节最小建议值 .....                                                | 11   |
| • 添加了4.2 节 CapTlvate 器件 SNR，并更新了从第 4 节移过来的内容 .....                   | 12   |
| • 移动并更新了5 节解读结果 .....                                                | 13   |
| • 添加了6.3 节计数和变化百分比分析（1.5 mm 镀层与 7.5 mm 镀层） .....                     | 18   |

## 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 © 2022，德州仪器 (TI) 公司