

MSP430 电容单触式传感器设计指南

Vincent Chan, Steve Underwood

摘要

此应用报告讨论采用 MSP430 微处理器来设计 RC 型电容单触式传感器。MSP430 具有一些独特的特性，非常适合与电容式触摸传感器相连接。RC 型方法无需专门设计，可在 MSP430 产品系列中的所有器件实施。此方法本身还具有低功耗特性，可实现超低功耗的应用。此应用报告还包括针对在产品中应用电容式传感器的使用指南。

内容

| | | |
|---|------------------------|----|
| 1 | 操作原理 | 2 |
| 2 | 基本电容测量 | 2 |
| 3 | 改善噪声抗扰度与提高敏感度的方法 | 3 |
| 4 | 处理测量结果 | 7 |
| 5 | 构建实验板 | 7 |
| 6 | 系统资源 | 10 |
| 7 | 电路板布局注意事项 | 11 |
| 8 | 覆盖 | 13 |
| 9 | 参考资料 | 18 |

列表

| | | |
|----|-----------------------------|----|
| 1 | 开放式电容器用作传感器 | 2 |
| 2 | 充放电序列 | 3 |
| 3 | 改善噪声抑制的测量周期 | 4 |
| 4 | 多传感器充放电配置 | 4 |
| 5 | 软件低通滤波器 | 5 |
| 6 | 示波器与电容噪声 | 5 |
| 7 | 示波器与 IIR 滤波器 | 5 |
| 8 | 基准电容 | 6 |
| 9 | 滑动窗口 | 7 |
| | 加权 | 7 |
| | 新值输出 | 7 |
| 12 | MSP430 实验板 | 8 |
| 13 | 板的按键板布局 | 9 |
| | 触摸处理器 | 10 |
| 14 | 触摸板的大小和形状 | 11 |
| 16 | 按键板敏感度（覆盖层厚度 = 0mm） | 12 |
| | 按键板敏感度（覆盖层厚度 = 0.8mm） | 12 |
| 18 | 按键板敏感度（覆盖层厚度 = 2.4mm） | 13 |
| 19 | 覆盖层厚度与敏感度 | 14 |
| 20 | 间隙和覆盖层厚度的影响与敏感度 | 15 |
| 21 | 射频发射 | 17 |
| 22 | 射频干扰敏感度 | 18 |

1 操作原理

通过“开放式”电容器结构 即可构建单触式感应电容传感器 以便通过导电外物（在此例中为手指）对电场进行干扰。

图 1 列出了在 PCB 上构建电容器的示例。其中 按键板与其周围的接地板之间将形成电容器。允许电场泄漏到电容器的上方区域。当手指靠近电容器的上方区域时 它会干扰电场 从而引起电容发生相应变化。

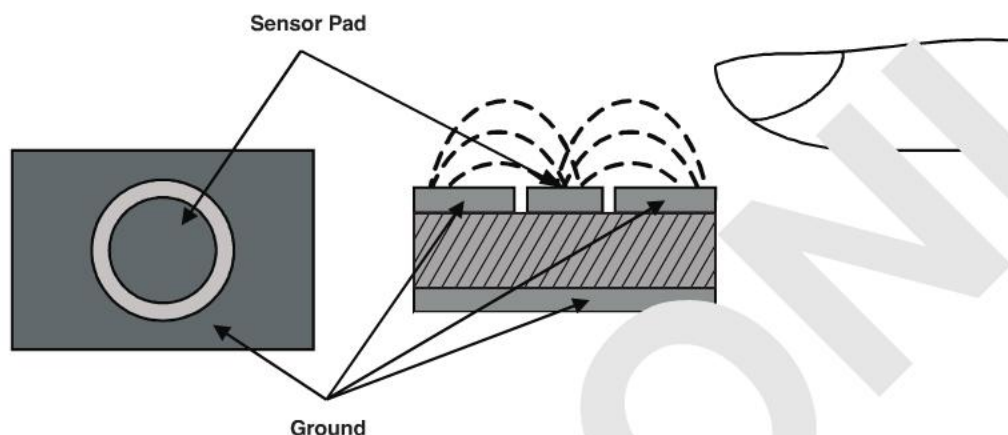


图 1. 开放式电容器结构示意图

接地板通常放置在按键板的下方 用于屏蔽其它电子产品产生的干扰。此类设计受 PCB 上的寄生电容和温度以及湿度等环境因素影响。因此 检测系统需要持续监控和跟踪此变化。

2 基本电容测量

本节以 RC 充放电形式和硬件 来描述基本电容 测量。

RC 放电时间用于测量传感器 电容。该方法在 1976 专利（当前已过期）中进行了描述。电容传感器形成 RC 电路的电容部分。使用 I/O 线路进行充放电 并且当电容器电压值超出阈值时产生中断。

事件的发生顺序如下：

1. 电阻一端连接传感器 另一端接地。传感器与 I/O 线路相连。
2. I/O 端口设为输出 并驱动电阻。此设置 将电容传感器迅速充电至接近 V_{CC} 。自由运行的定时器读数 并标记开始时间。此示例采用 Timer_A 的 TAR。
3. I/O 设为输入 并启用上拉电阻。然后 电阻释放电容传感器的电能。微处理器进入低功耗模式 0。
4. 当电容器电压超过阈值时 产生中断。
5. 中断服务例程可再次读取自由运行的定时器 (TAR) 的读数 并计算放电至 V_{IL} 的时间。微处理器 返回低功耗模式 并继续运行。

传感器的电容与传感器 按键板的电容成比例。因此 为了给测量提供足够的分辨率 RC 放电时间必须足够慢。要获得足够的放电时间 应使用约 $6M\Omega$ 的大值电阻。借助此电阻 电容器的充电电流仅约 $500nA$ 。因此 具有极低漏电的 I/O 端口。

MSP430 的 I/O 端口最大漏电流为 $50nA$ 非常适合使用此方法来感应电容的变化。端口 1 和端口 2 各有八条独立的中断线路 可在系统中检测最多 16 个传感器。

图 2 显示了上述事件的发生顺序。图 2 的表格显示了微处理器的活动方式 它对于超低功耗应用极为重要。可以构建每键功耗仅为 $10\mu A$ 至 $20\mu A$ 的 MSP430 检测器。例如 这对于始终进行检测的遥控器至关重要。

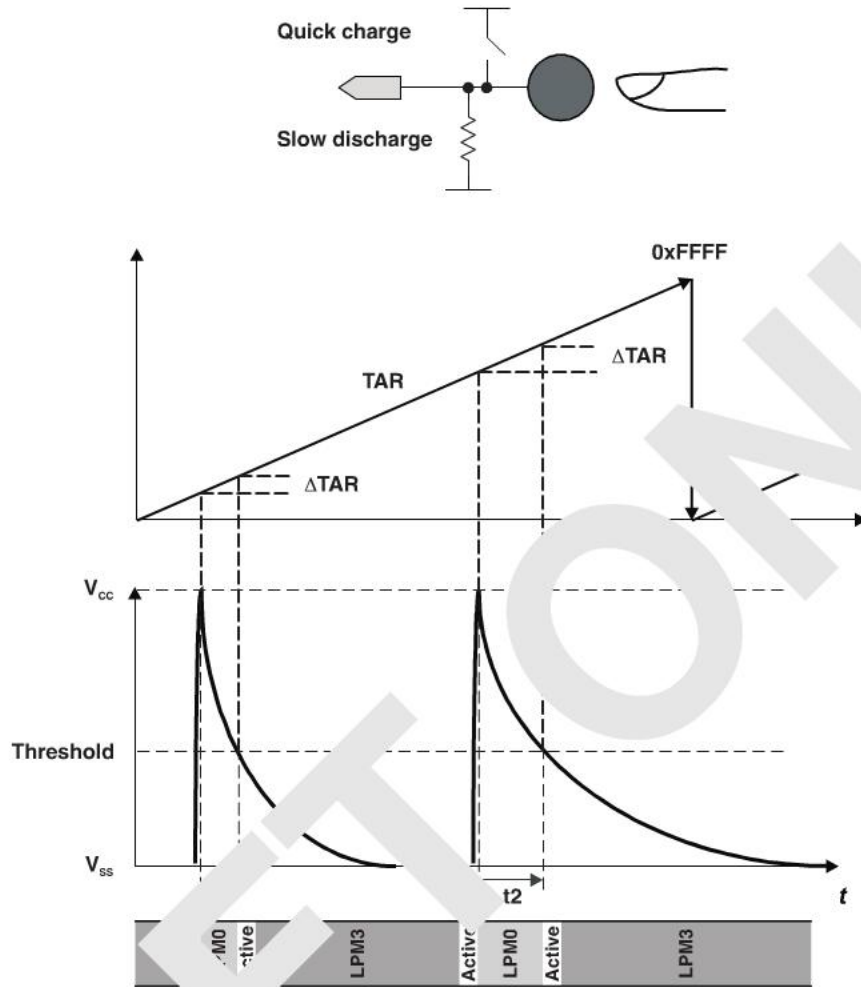


图2. 充放电序列

3 改善噪声抗扰度与提高敏感度的方法

虽然此电容抗系统具有低功耗优点，但也有可能受到感应噪声的影响。该噪声源自人体，能拾取 50/60Hz 电源干扰或电源噪声。我们已开发两种方法，用于处理这些可能的噪声问题。

本文档将灵敏度定义为当手指进入按键板区域时的计数差异。它也称为 C_{Δ} 。

3.1 伪差分测量

图3显示了一种滤除共模噪声的简单硬件方法，即通过充电和放电的周期来测量电容值。这两种测量方法的平均值将用于下一阶段的计算。

如果这两种测量是在快速连续的情况下进行的，那么测量的平均值相对较慢的共模噪声就会表现出差分测量的形式。例如，可通过这种方式降低电源噪声。

充电和放电周期具有不同的阈值电平。因此，残留静态偏移分量将转换为附加电容偏移值。该应用旨在检测和测量电容基准值或标准值的变化，因此向此标称电容添加偏差值不会造成检测问题。

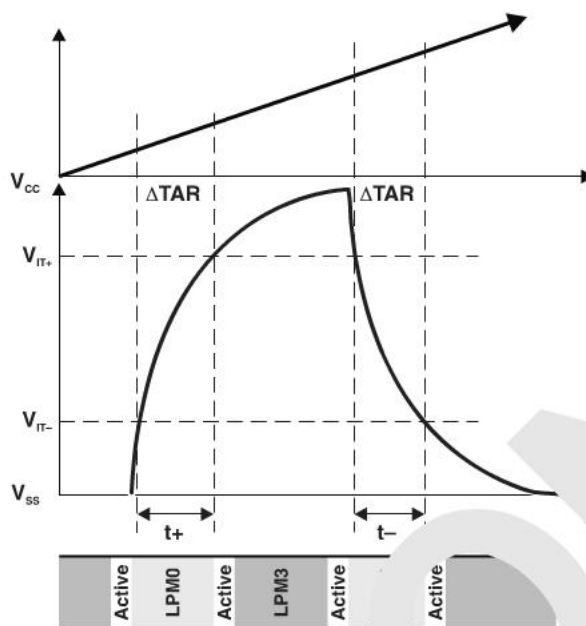


图 3. 改善噪声抑制的周期

要实施此方案，请使用电阻连接两条 I/O 线（请参见图 4）。当使用 P1.0 感应其触摸板时，P1.1 将转为输出模式，并用作充电和放电周期中的电流和灌电流。当使用 P1.1 感应其触摸板时，P1.0 将转为输出模式，并用作充电和放电周期中的电流和灌电流。此设计还具有将所需电阻数量减少一半的优点。

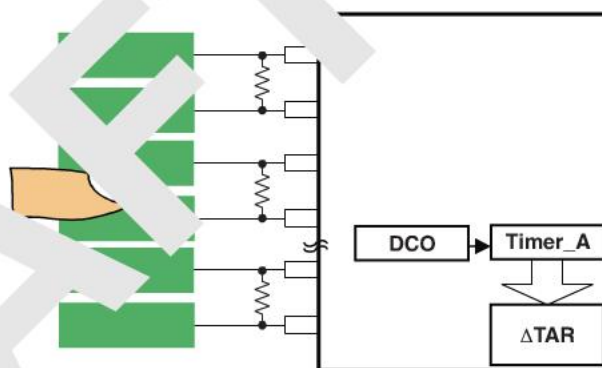


图 4. 多传感器充电/放电配置

软件 IIR 滤波器

一阶段输出将经过其它 IIR 滤波器。它基本上是直流跟踪滤波器。该滤波器可消除任何残留噪声，并能提高按键板的敏感度。尽管对速度有所影响，但整体效率将得到提高。图 5 显示了滤波器的结构。

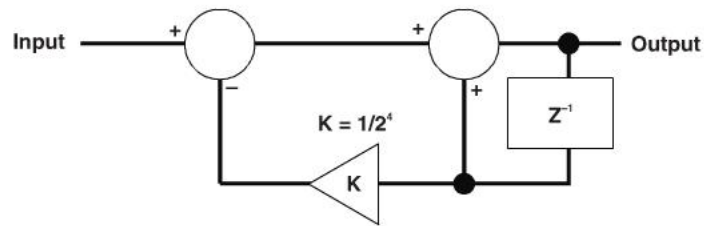


图 5. 软件低通滤波器

输入是指按键板瞬时电容读数与其基准电容值之间的差值。
此基准电容值是在按键板处于开路状态时进行评估的。

图 6 是示波器程序的屏幕抓图。当手指触摸传感器并用 1mm 厚塑料覆盖时，它会捕捉电容变化。
您可以清楚看到 50/60Hz 电源噪声拾取。

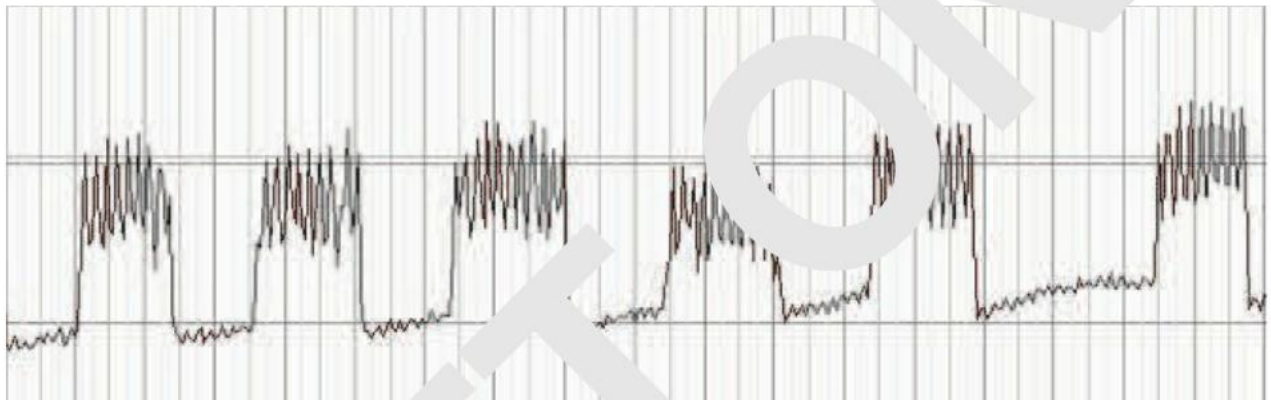


图 6. 示波器电源噪声

图 7 显示了单个 IIR 滤波器以及通过添加软件数字滤波器来抑制 50/60Hz 电源噪声而获得的显著改善结果。滤波器还会放大信号。

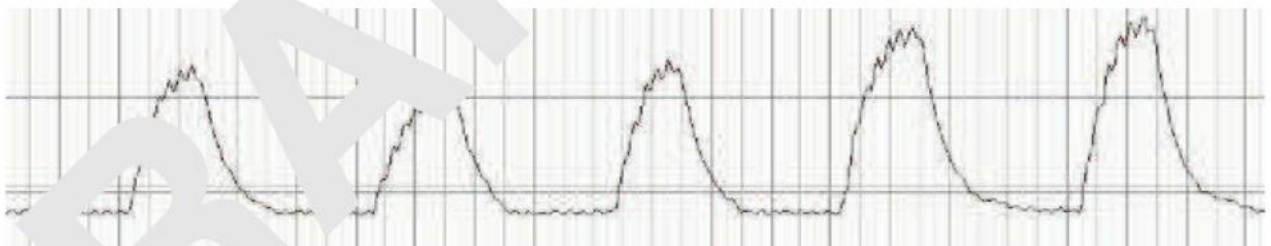


图 7. 示波器与 IIR 滤波器

3.3 跟踪基准电容值

触摸板的基准电容（触摸板在露天环境下的电容）可随着温度发生变化。因此 必须跟踪此缓慢变化。跟踪周期通常按分钟而不是秒计算。

另外 跟踪速度并非对称 跟踪增加的速度要必须比跟踪下降的速度更慢（在此应用各采用系数 10）

例如 如果手指缓慢靠近触摸板 适应程序应当足够慢 以便不会降低触摸板的敏感度。当手指拿开时 适应程序将迅速回溯到原始的露天值。图 8 显示了此程序。

当通过手指激活触摸板时 适应程序将停止。

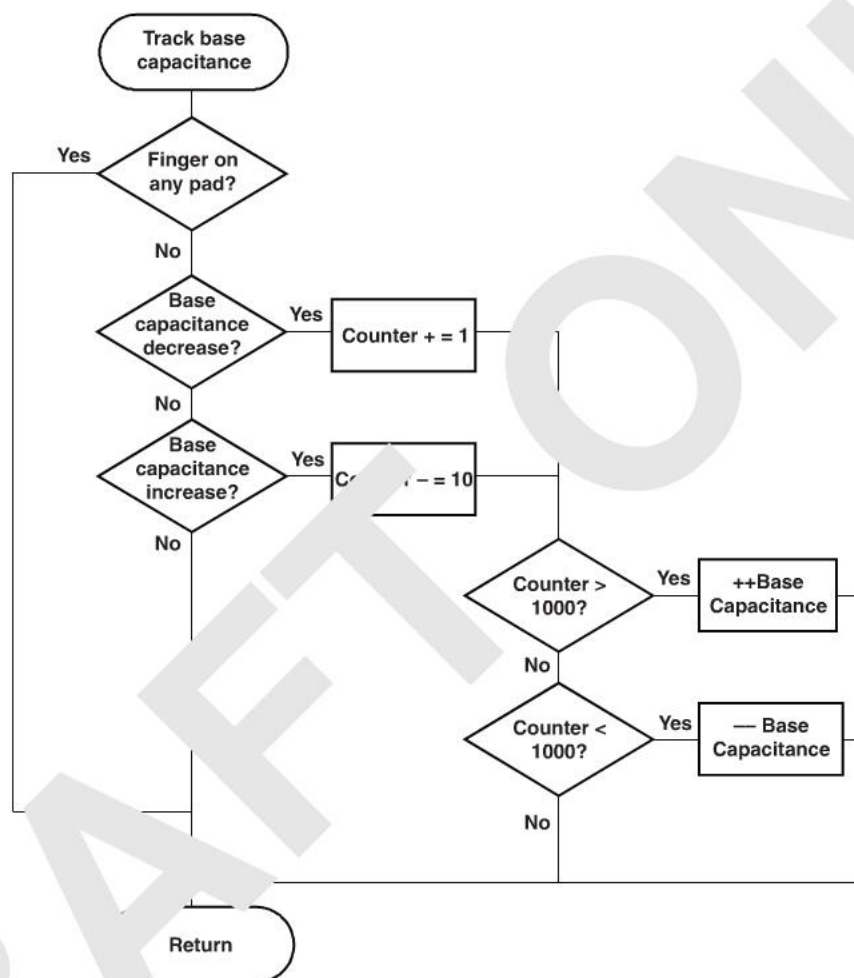


图 8. 跟踪基准电容流程图

4 处理测量结果

输出的结果应为清晰的电容值 且具有良好的敏感度。进行简单的按钮式测量或基于这些结果移动滑块。
在此应用示例中 一个滑块是用 14 个按键板连接组成的 形似一个电话拨号盘（请参见 图 9）。

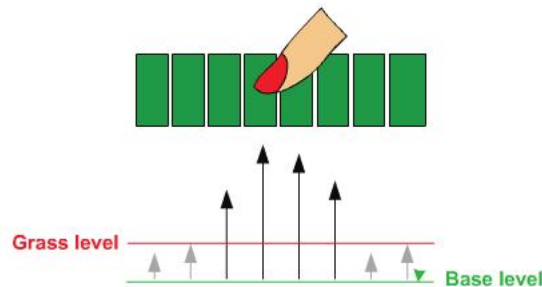


图 9. 滑块功能

要构建滑块功能 需要使用加权平均法（请参见 图 10）。此方法可在 10 个中间步阶中的两个物理按键板间产生更精确的微定位。此方法可提升 10 个按键 共 240 个步阶。

$$C_{HiRes} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} [(i) \times (C_{delta}[i-1] - C_{delta} \min)]}{\sum_{i=1}^{i=n} (C_{delta}[i-1] - C_{delta} \min)} \times \xi$$

10. 加权平均法

图 11 显示了手指在由五个多电容按键板组成的滑块上上下下滑动产生的输出结果。
输出结果的线性允许每个按键板 10 个步阶 并且 峰至峰差值约为 60 个计数。

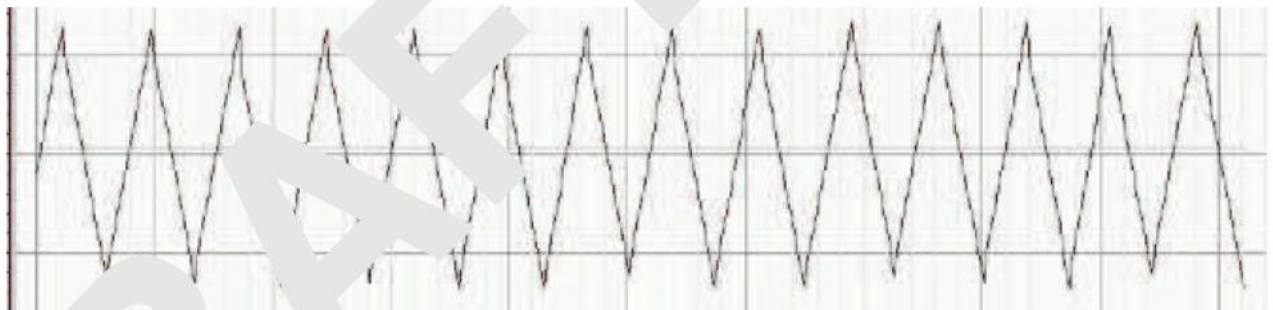


图 11. 滑块输出步阶

构建 实验板

MSP430 实验板 F2013 用于演示滑块功能。F2013 是 MSP-EXP430FG4618 实验板的一部分（请参见 图 12）。

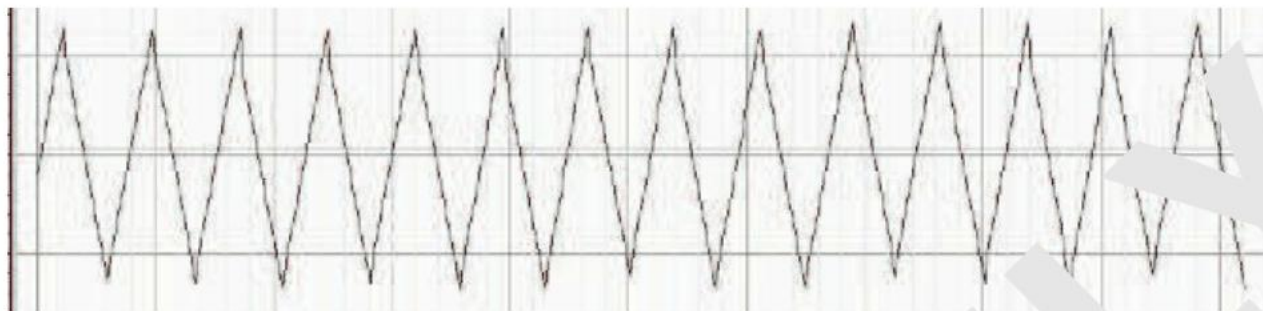


图 12. MSP430 实验板

实验板由排列成数字 4 形状的 16 个按键板组成（请参见 图 13）。重新使用 I/O 驱动这些按键板。

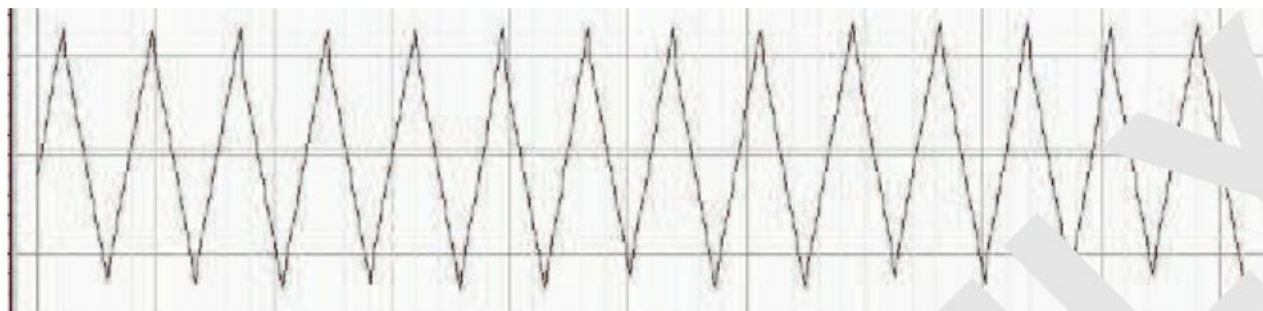


图 13. 实验板的按键板布局

MSP430 触摸板处理器与主机处理器连接 旨在获取触摸板的输出并显示它们。它还可将数据发送至 PC。同时应用程序将以不同的形式在 PC 上显示这些数据（请参见 图 14）。

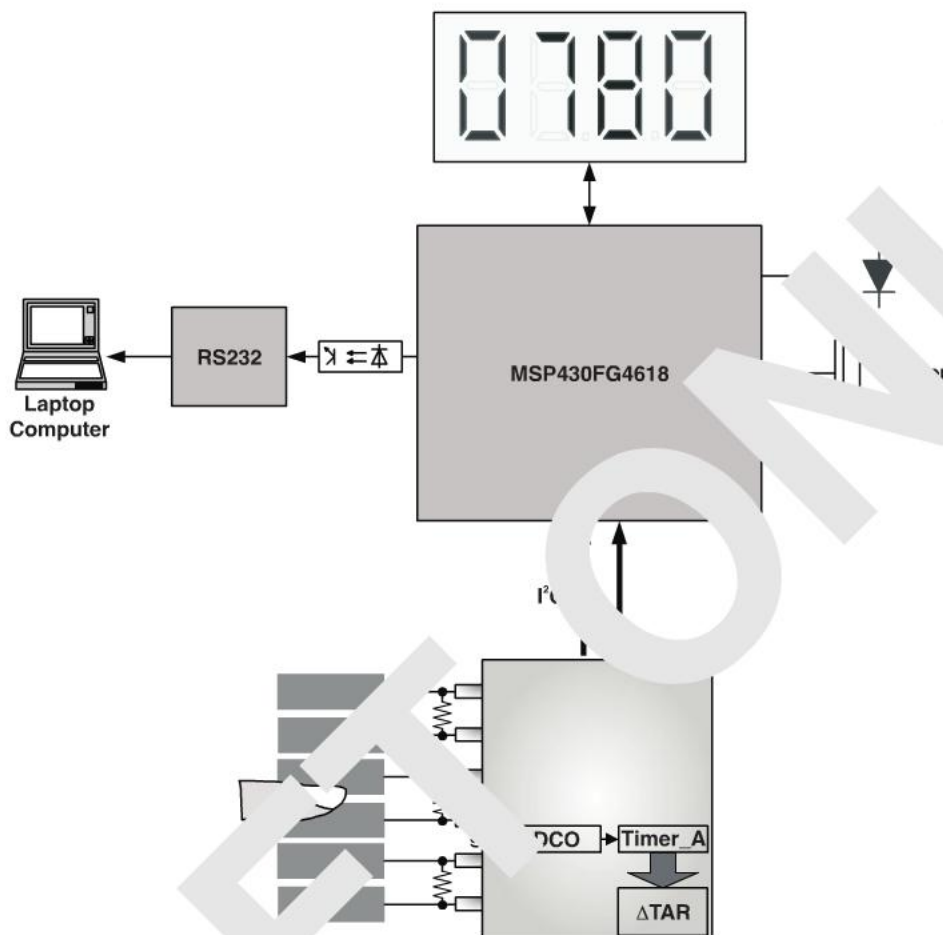


图 14. 触摸板处理器

5.1 演示示例

演示示例位于 EXP430 618 电路板上。要运行实验，必须先将 FET 工具连接到顶部的 JTAG 连接器。然后将主机程序 `FG4619_host_comms` 载入 U3。另外，PC 程序 (`touch_strip.exe`) 通过串行端口 COM 运行，而该端口与电路板相连接。然后，应用程序可载入目标器件 U4 中。

应用触摸板有五个应用示例：

- 使用五个按键板（按键板 7、6、1、4 和 3）产生滑杆功能并输出 1 至 255 计数。当滑块沿着滑块移动时，读数将通过 I²C 发送至具有 LCD 驱动器的主机处理器 (MSP430FG4618)。数值将显示为递增或递减数。另外，在 PC 上运行的 `touch_strip.exe` 程序将在容量栏上显示此数值（通过 UART 发送该数值）。
- 使用五个按键板（按键板 1、3、0、6 和 4）检测 1 至 5 按键情况。当按下每个按钮时，数值将通过 I²C 发送至主机处理器 (MSP430FG4618)。显示按键编号，且指向按键方向的箭头（4 = 向上、0 = 向下、3 = 向右并且 6 = 向左）将通过 UART 显示在 LCD 屏幕和 PC 程序 `touch_strip.exe` 上。

6 系统资源

对于上述的滑块应用和 I²C 通信，所使用的系统资源包括：

- 1950 字节的 ROM
- 96 字节的 RAM

- 低于 0.1MIPS
由于处理器大部分时间处于休眠模式 因此对实际 MIPS 的要求非常低。
只有当按键数增至 16 时 才需要按比例增加 RAM 大小。

7 电路板布局注意事项

7.1 将电路连接到触摸板

由于电线会增加基准电容 因此应尽量缩短触摸板的连接线。
由于弯曲可能影响整个电容变化 连接线应尽可能保持稳定的形状 这点同样非常重要。
由于触摸板驱动电路本身具有高阻抗 因此应避免将高速或大电流驱动电线靠近触摸板。

7.2 触摸板的形状和大小

可使用标准实体填充的圆形或方形按键板。可在按键板上钻孔以便提。容性能。
按键板周围通常是接地区域。可以使用网状和实体填充。与接地区域的间距通常为按键板尺寸的 1/20。
如果使用 10mm 的按键板 则适合使用 0.5mm 的间隙 (请参考)。

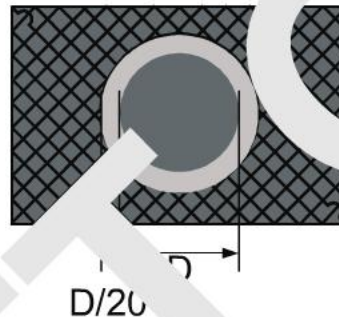


图 15. 触摸板的大小和形状

在滚动条应用中 按键板应紧密地装在一起。在此情况下 未使用的相邻按键板将通过器件接地。
这将在活动按键板周围形成动态接地平面。

通常 按键板尺寸 其灵敏度。
该限制是当手指 板区域。增加按键板尺寸并不会产生更好的效果。
按键板与接地平面 影响其灵敏度。

在滚动条应用中 这一点很重要。普通手指应能覆盖一个半大小的触摸板。

图 显示了对于不同的覆盖层厚度 灵敏度相比于按键板尺寸和间隙的变化。
计数值 示当手指 按键板与未触摸按键板时所看到的平均差值。采用的时钟速度为
Hz (参考 16MHz)。

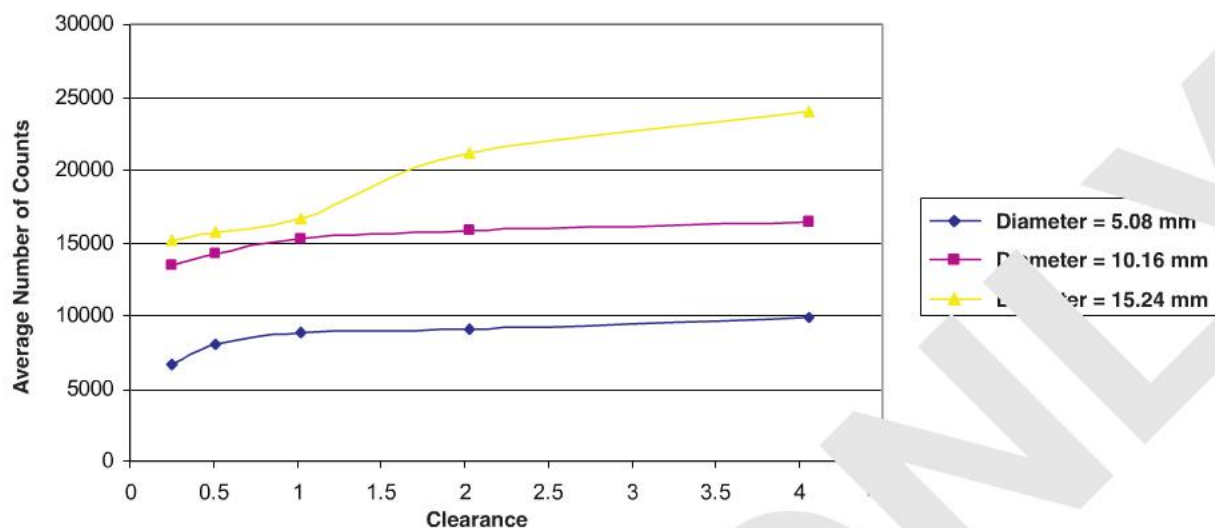


图 16. 按键板灵敏度 (覆盖层厚度 = 0mm)

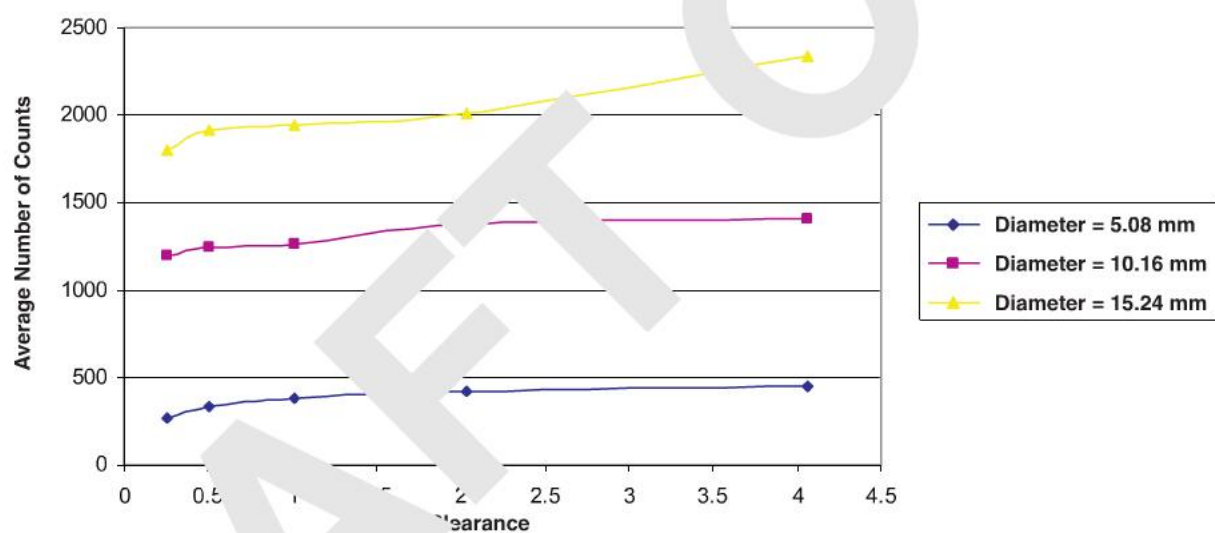


图 17. 按键板灵敏度 (覆盖层厚度 = 0.8mm)

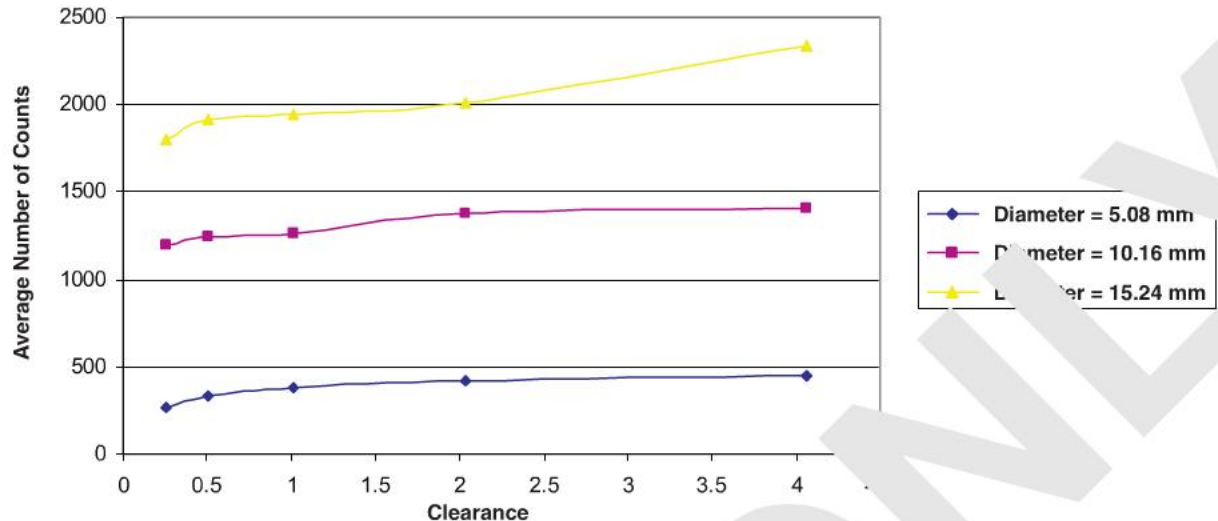


图 18. 按键板敏感度 (覆盖层厚度 = 2.41 mm)

7.3 PCB 厚度与非活动表面接地

由于电容器传感器板通常放置在其它电子器件的顶部，这有助于将传感器板与 PCB 的下侧，使传感器能够屏蔽下方电子器件产生的辐射噪声。

如果采用 FR4 材料，PCB 的厚度对传感器影响不大。若采用柔性 PCB 材料，如聚酰亚胺薄膜 (Kapton)，那么材料越薄，下方的接地平面越靠近传感器按键的表面，且可能干扰其电容性能。通过使用 40% 或更小的网状接地可以减小耦合区域，从而能够降低此影响。

8 覆盖

8.1 覆盖材料

选择覆盖材料时须考虑两大因素：

- 电容耦合性能 (介电常数)
- 静态击穿特性

表 1 显示了一些常见材料的介电常数：

表 1. 常见材料的介电常数

| 材料 | ϵ_r (介电常数) |
|------|---------------------|
| 空气 | 1.0 |
| 玻璃 | 7.6 至 8.0 |
| 聚酯薄膜 | 3.2 |
| ABS | 3.8 至 4.5 |
| 木头 | 1.2 至 2.5 |

材料的介电常数越高，手指与传感器板之间的电容耦合性能就越佳。除空气和某些木头外，上述材料非常适合用作覆盖材料。

由于空气具有较低的电容耦合特征，因此应尽量不要在传感器板与覆盖材料之间留有空隙。空隙还可能聚集水分，当温度突然改变时这些水分可能凝聚到传感器表面。请参阅 8.3 节了解有关粘合和填充复合材料的信息。

表 2 显示通过覆盖一些常用材料，可避免出现 12kV 损坏的最小厚度：

表 2. 12kV ESD 保护的最小厚度

| 材料 | 最小厚度 |
|--------|--------|
| FR-4 | 0.4mm |
| 聚酰亚胺薄膜 | 0.04mm |
| 丙烯酸 | 0.9mm |
| 聚碳酸酯 | 0.8mm |
| 玻璃 | 1.5 mm |
| ABS | 0.8mm |

要增强 ESD 保护，可添加一层聚酰亚胺薄膜，这可以大幅提高覆盖层的击穿容限。

8.2 覆盖层厚度与敏感度对比

覆盖层厚度通常与敏感度成反比，也成反向指数关系。

诸多因素可能影响电容传感板的敏感度：

- 按键板尺寸
- 覆盖层材料及其厚度
- 感应方法增益（包括 IIR 滤波器增益和时钟速度）

表 3 显示在时钟速度为 8MHz 且 IIR 滤波器增益为 4 时，覆盖层厚度与电容传感器应用的类型。

表 3. 典型覆盖层厚度

| 应用 | 典型厚度 |
|----|--------|
| 按钮 | <5.0mm |
| 滑动 | <1mm |

图 19 和 图 20 显示了相对于不同覆盖层厚度的敏感度。敏感度以 Δ 计数显示（手指触摸和移开）。

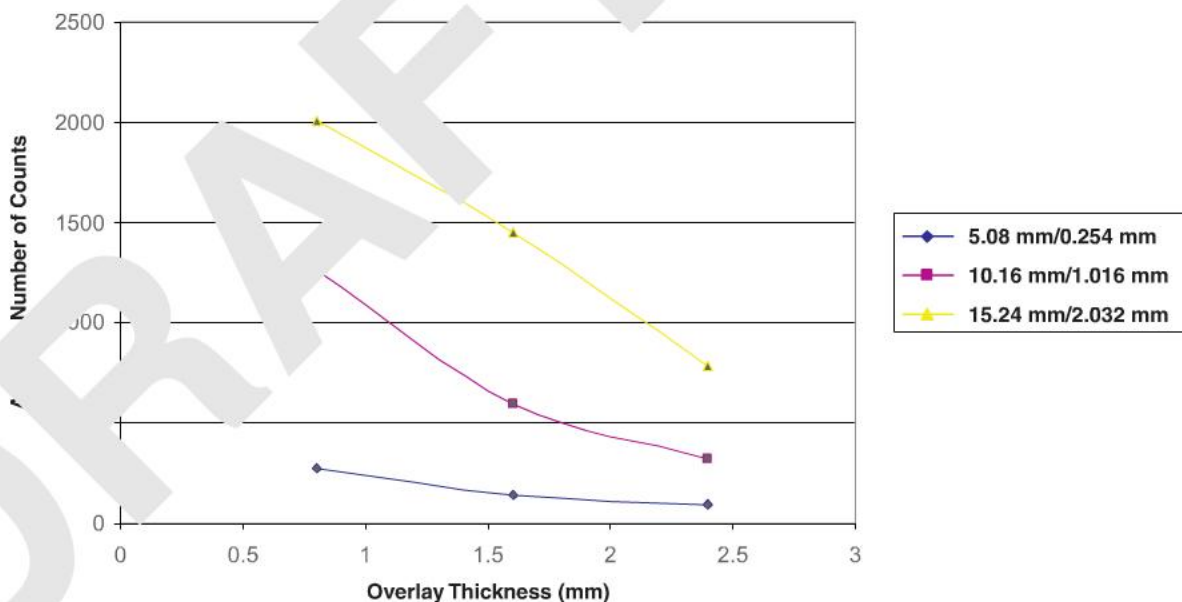


图 19. 覆盖层厚度与敏感度

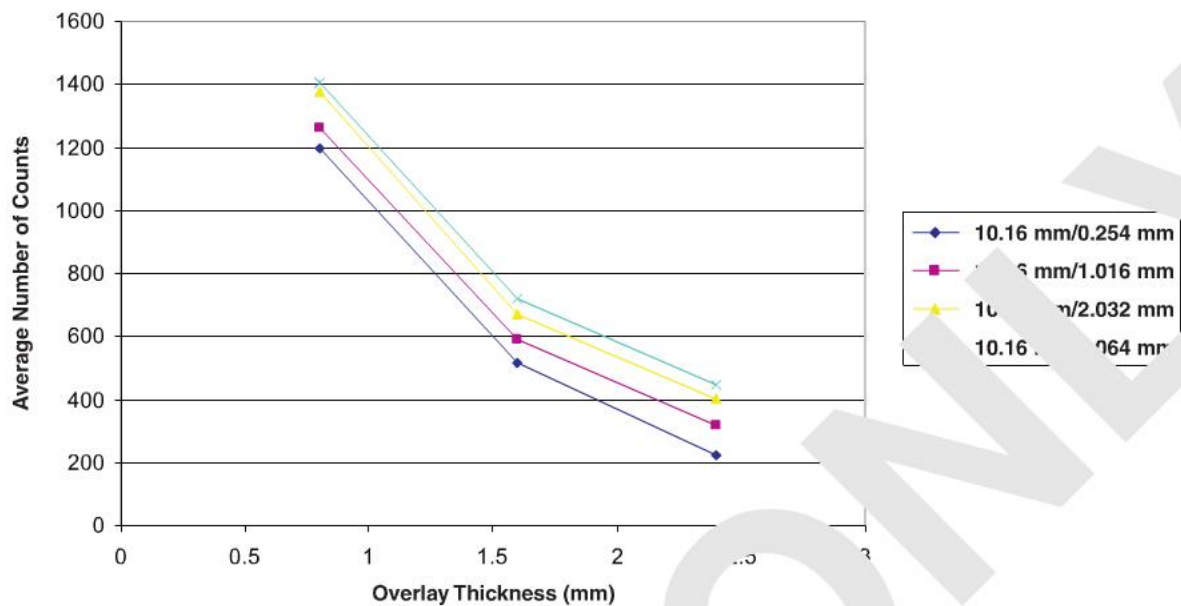


图 20. 间隙和覆盖层厚度的影响与敏感度

8.3 粘合和其它填充复合材料

在大多数应用中，传感器电极与覆盖层材料之间应密封耦合。设计人员可以在填充表中选择以机械方式还是粘合方式将覆盖层材料按压在 PCB 板上。选择粘合剂时须考虑两大因素：

- 材料不得携带电荷并且不得影响电容性能（因此，它应当为绝缘体）。
- 材料不会吸收水分。

3M™ 467MP 和 468MP 高性能丙烯酸双面胶带具有 4.2mil 58 磅涂有聚乙烯的牛皮卡纸，是此应用的理想选择。

8.4 射频 (RF) 发射和敏感度测试结果

许多触摸板都应用于在强大射频源附近工作的个人便携式产品（如蜂窝式电话）。显然，消除这些源的干扰至关重要。实验板可用作测试平台，用于评估产品在此类环境中的性能。经测试，电磁密封消声测试室内需要使用 EN55024。

手指的存在明显影响了 RF 接收和辐射的水平。实际测试必须允许此情况存在。但是，频率扫描测试需要相当长的时间。人员要在密封的测量室呆一小时，一点不现实。普通盐（氯化钠）的浓缩液在测试个人无线产品中广泛用作手指。用塑料袋装满饱和盐溶液并对其进行密封。袋子一角使用导电胶带，用来模拟手指。触摸板的反应与对实际成人手指的反应大致相同。

以下物品放置在密封室内：

- 待测试的实验板是通过其板载电池供电的
- 用于发出（对于敏感度测试）或接收（对于发射测试）的天线，进行良好控制的指向待测试板的轴
- 监控场强的另一根天线

在放射测试中，连接室外的频谱分析仪，连接到主天线上。

更多的测试设备会用于敏感度测试。室外有一台射频信号发生器，可产生 30MHz 至 1GHz 的载波频率。射频信号发生器则以相似的频率与一个 25W 的射频放大器相连，而射频放大器则与室内的主天线相连。场强计与室内的另一根天线相连，并在整个频率扫描测试过程中受到监控。从实验板连接一根 RS232C 导线到室外的 PC 上。由于端口可对实验板的其余部分进行光隔离，所以导线对测试的影响极小。

通过使用频谱分析仪并将电路板放在不同的方向（电路板粘接或未粘接盐水袋），可以测量电路板的辐射。只有在未使用盐水且将天线直接指向实验板上的 9 引脚 RS232C 接口时，才能清楚看到包括测试设备本噪声在内的任何情况。其中，在频率为 134.5MHz 时可看到细微反应，其反应远低于 EN55024 允许的发射电平。实验板上的某部分可能在此频率处谐振，因为该频率是实验板上任何时钟信号频率的许多倍（请参阅图 21）。

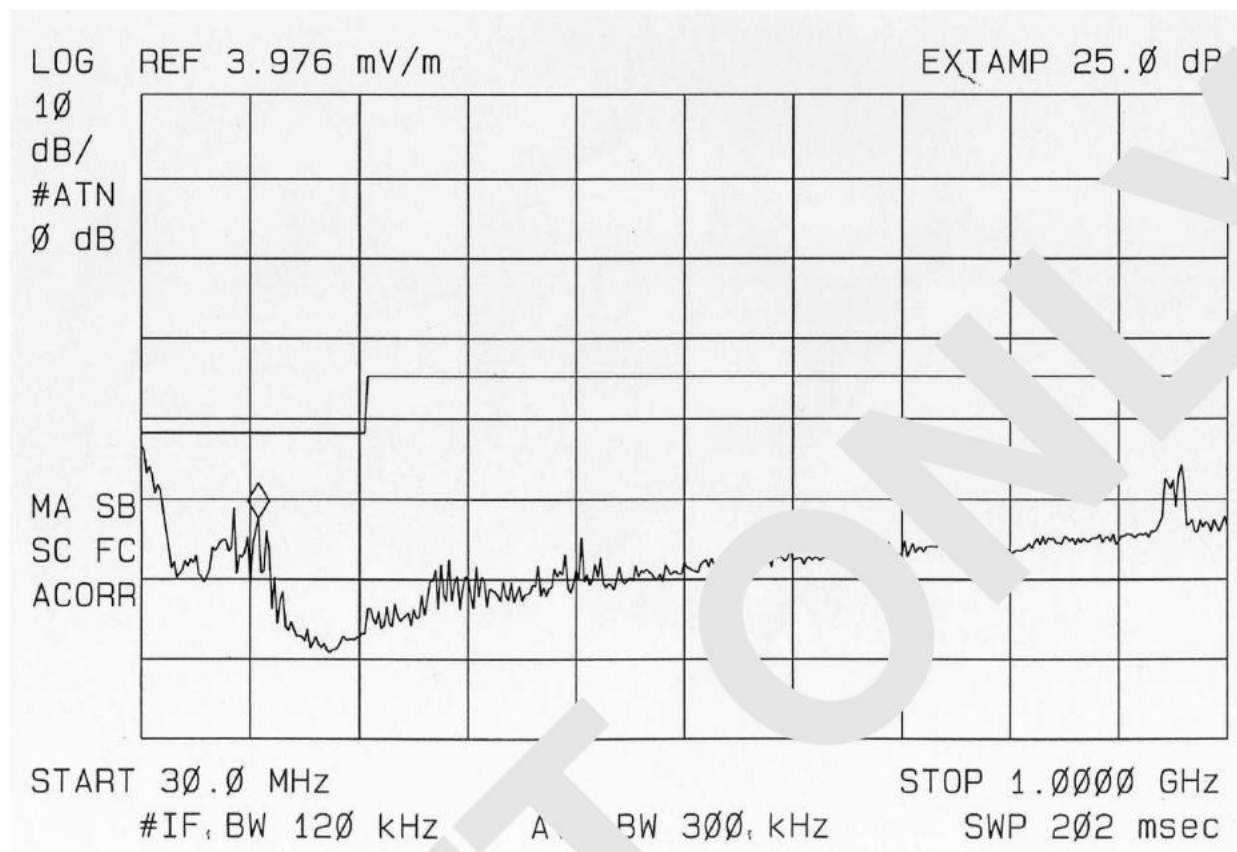


图21. 发射

敏感度测试包括以极低的速率来扫描 30MHz 至 1 GHz 的信号发生器。因此，可能存在的任何窄带问题在一段时间后即会显现出来。在这些扫描过程中，MSP430F2013 软件将通过其 RS232C 接口，将触摸板的所有响应值发送至外部 PC。对于恒定的信号强度，测量的场强会随着发生器的频率而变化。EN55024 要求在最小场强 3 V/m 时进行测试。在频率扫描期间调整信号强度，以确保场强保持在 3 V/m 至 4 V/m 之间。当盐水袋粘接到和未粘接到触摸板时，分别进行频率扫描。敏感度裕度在最差频率时约为 750 计数（请参见图 22）。

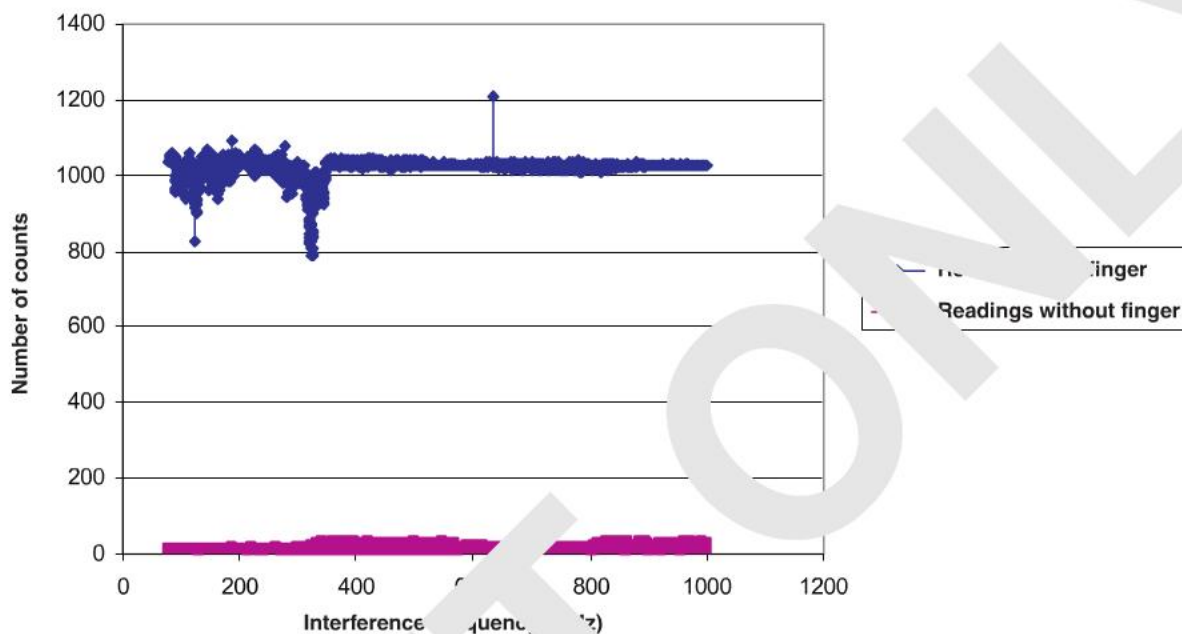


图 22. 射频干扰敏感度

9 参考资料

1. 美国专利 3931610 电容按钮传感传感器和方法
2. MSP430x2xx 寄存器指南 (SLAU144)
3. Cypress Semiconductor 产品手册 (AN2992)
4. 通过 MSP430 实现 PC 电容触摸感应 (SLAA363)

