

电容式接近感应技术在智能手机中的新型应用

引言

红外（IR）接近传感器目前被广泛的应用于智能手机中来防止通话时用户脸部造成的触摸屏误触，同时降低功耗。IR 传感器具有探测距离远，反映速度快等优点，但是其昂贵的成本和复杂苛刻的装配要求，促使手机厂商寻求成本更低、结构简单的方案。电容式接近感应在白色家电、智能家居等领域的普及，为手机接近感应方案提供了一种有效的思路。本文提出了一种基于电容变化的手机接近感应方案，给出了具体的系统结构、硬件设计和控制要点。此方案已经成功地应用到知名品牌的手机产品中，取得了很好的效果。

一 系统结构

电容式接近传感系统的结构如图 1 所示。控制器通过电极检测物体靠近手机时引起的电容值变化，一旦电容值变化超过控制器程序中设定的阈值，控制器便会向手机处理器发出中断信号，如果此时手机正处于通话模式，主机将关闭 LCD 显示和触摸屏等部件，实现降低功耗和避免误触等目的。



图1 电容式接近传感器的系统结构

电极负责探测电容变化，其设计质量很大程度上决定了系统的整体性能。电极本质上就是一块平面导体，可以是 FPC 上的一块铜皮，也可以是电容触摸屏上的一块 ITO 薄膜。

图 2 给出的 ITO 薄膜电极的设计示例。电极的尺寸直接影响接近感应的探测距离。在其他设计不变时，探测距离随电极尺寸的增大而增大。电极在外形上要尽量圆滑，避免出现直角或者锐角，而且电极要尽量完整。在手机应用中，电极通常采用矩形来最大化感应面积，此时需要注意圆弧化电极的拐角。电极应该放在 FPC 或者 ITO 薄膜贴近触摸屏的一侧，而且背面的另一侧通常需要腾空。电极背面对应的手机前壳区域应当避免有大面积的金属，否则会影响探测距离。电极周边需要铺设地线来增强电容基准，屏蔽噪声，并且提高感应方向的直线性。电

极和地线的间距建议为 0.5mm 到 1mm，地线的宽度根据具体情况而定，建议不小于 1mm。电极到芯片的引线应该尽量短且细，以减少寄生电容和耦合噪声。

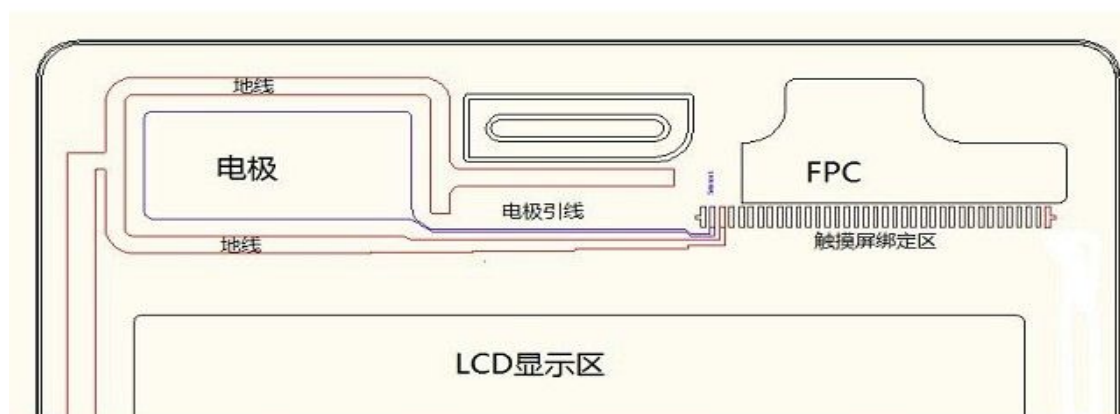


图2 ITO薄膜电极设计图

影响系统性能的另一主要因素是控制器。

二 硬件电路

本文设计的电容式接近感应的电路图如图 3 所示。CY8C20055 的外围电路很简单，最小配置只需要 2 个电容 — 调制电容 C1 和去耦电容 C2。

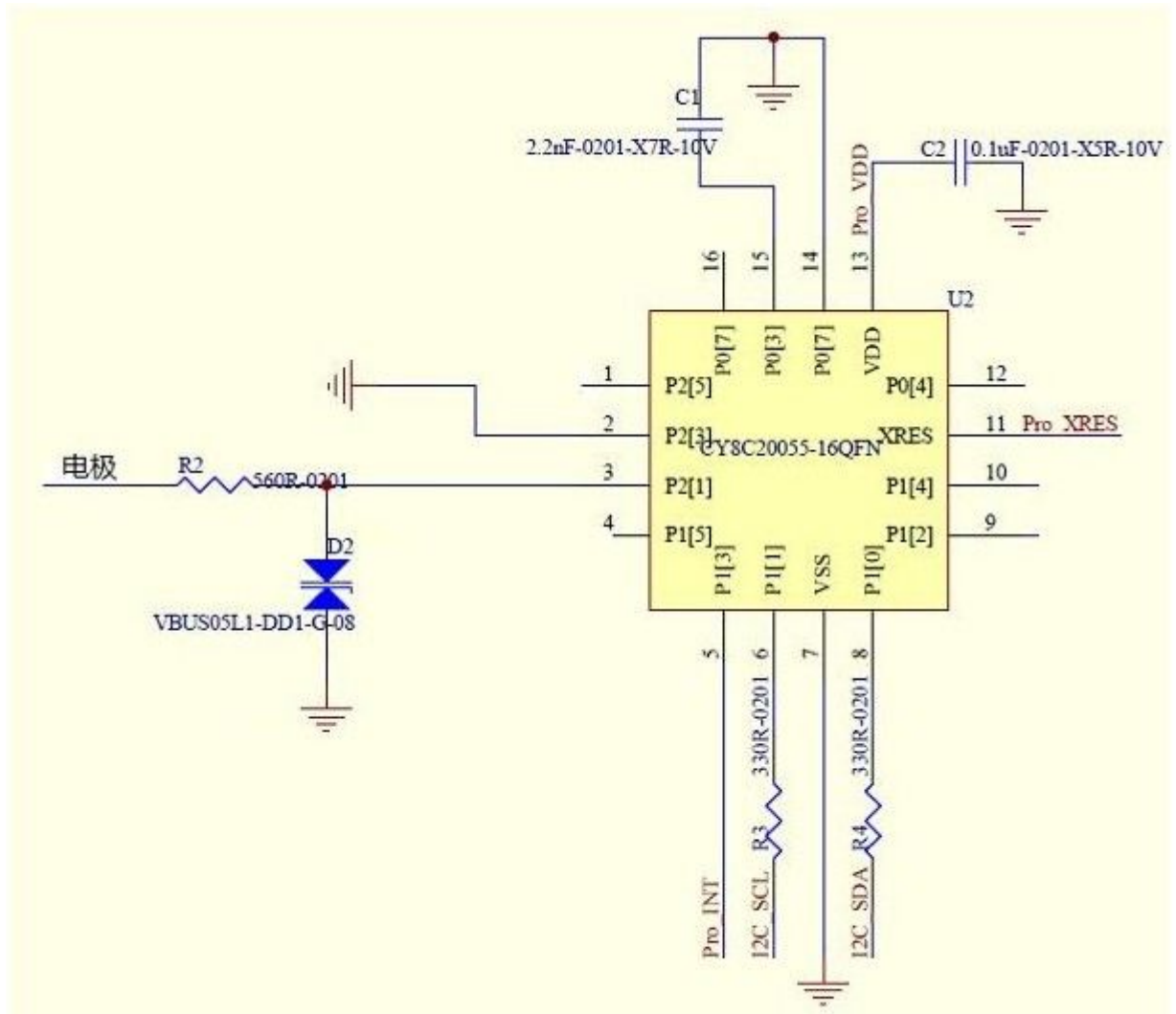


图3 电容接近感应电路图

在此电路中，芯片的 PIN 3 连接到电极来采集电容信号，推荐在连线靠近芯片处串联一个典型值为 560 欧姆的电阻，来抑制 RF 噪声。手机等移动产品都需要通过严格的 ESD 测试，由于电极的位置在手机上部，距离手机边缘、听筒、耳机插孔等很近（图 2），而且电极面积相对较大，ESD 电弧很容易在经过这些开孔或者缝隙进入手机后耦合到电极上，对芯片管脚施加较大的电冲击，存在损坏管脚的风险。本设计在靠近芯片一侧添加了 TVS 之类的 ESD 防护元件来保护芯片，需要注意的是所选 TVS 器件的自身电容不能太大。CY8C20055 提供 I2C 或者 SPI 接口与主机进行通讯。本设计中，主机可以通过 I2C 总线来配置感应参数、获取数据、关闭或唤醒芯片等等，也可以进行芯片程序（Firmware）的在线升级。

在 PCB 或者 FPC 布局时，调制电容和去耦电容需要尽量贴近芯片管脚。在走线时，主要注意避免电极引线 and I2C 信号线、电源线平行，如果无法避免，应该在走线中间加入地线作为隔离。

三 控制器内部逻辑

本文的电容式智能手机接近感应方案是电容检测技术在赛普拉斯 PSoC (Programmable System on Chip) 平台上的新型应用。PSoC 技术是在一个 MCU 内核周围集成了可配置的模拟和数字外围器件阵列, 利用芯片内部的可编程互联阵列, 有效地配置芯片上的模拟和数字块资源, 达到可编程片上系统的目的。一个 PSoC 器件最多可集成上百种外设功能, 从而帮助客户节约设计时间和板上面积, 降低了功耗和系统成本。

整个系统的工作过程如图 4 所示。程序控制 CSD 模块对电容信号进行采样和 ADC 转换, 然后通过数字滤波器对转换后的数字信号进行过滤和处理, 同时由内部状态机判断输出接近感应的状态, 由中断信号或者 I2C/SPI 接口通知手机处理器。下面来介绍一下整个系统主要模块的功能。

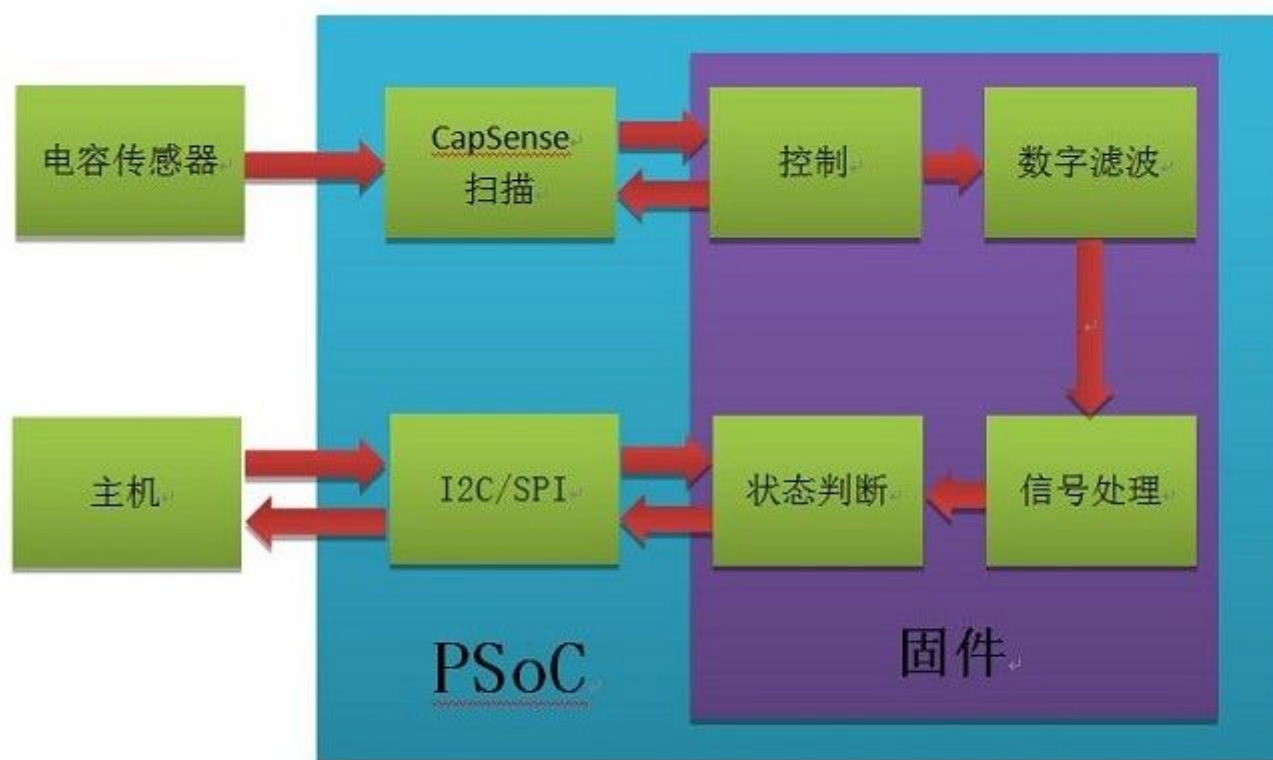


图4 电容式接近感应PSoC系统的工作过程

CSD 模块

CSD 是指 CapSense Sigma-Delta 调制电容感应。图 5 显示了 CSD 的原理框图。

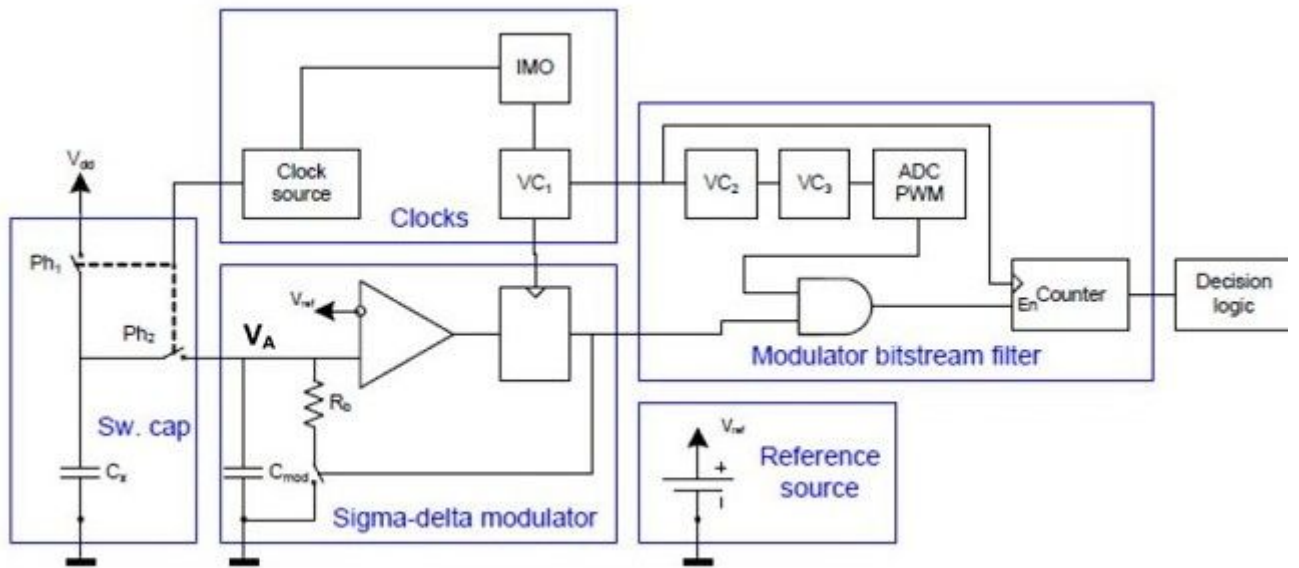


图5 CSD原理框图

开关电容在 Ph1 和 Ph2 相位的时候分别接到 Vdd 和 VA，所以我们可以把它看作一个等效电阻，等效电阻 Req 通过 Vdd 对调制电容 Cmod 进行充电。当 Cmod 的电压达到比较器的参考电压 Vref 时，比较器触发放电电阻 Rb 对调制电容放电。当调制电容上的电压下降到 Vref 以下时，放电电阻 Rb 被断开，此时继续对调制电容进行充电。如此循环充放电使得调制电容上的电压抑制在比较器参考电压 Vref 附近上下浮动。同时比较器会输出一组比特流，这组比特流与 PWM 相与之后便可得到传感电容的大小，如图 6 所示。

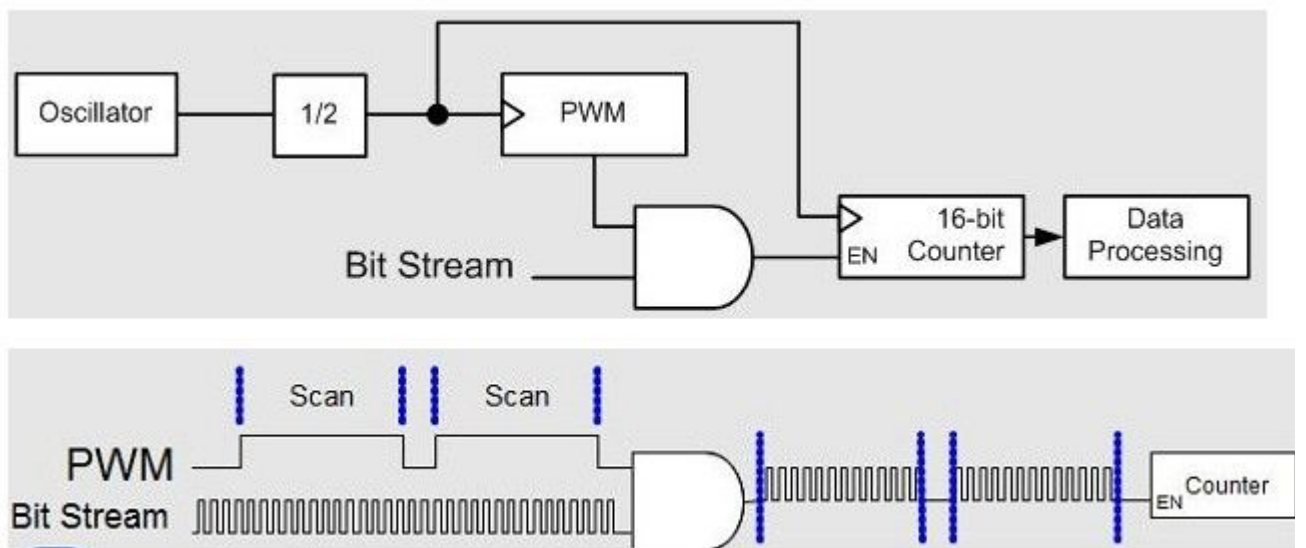


图6 输出比特流

传感电容的增加会使得等效电阻降低，充电电流增加，这样就会使充电时间缩短。充电时间的缩短会使占空比提升，如图 7 所示。

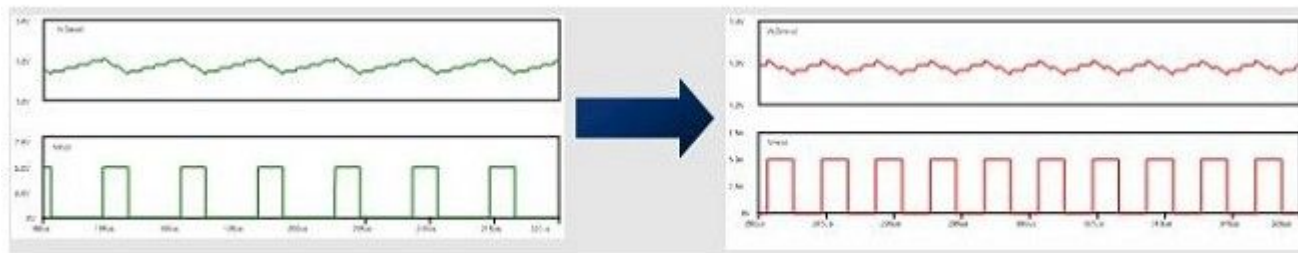


图7 有接近感应时占空比的变化

数字滤波

接近感应要求控制器能够检测到稳定的小信号来提高探测距离，因此控制器需要设置足够长的采样周期来提高信号幅度，同时也需要设置较低的触发阈值来提高灵敏度。灵敏度的提高意味着系统更容易受到噪声的干扰。因此，为了提高整个系统的信噪比，本文对原始信号依次使用了三种有效的软件滤波方法：中值滤波、均值滤波和 IIR 数字滤波，来滤除噪声。

1. 中值滤波器

对于瞬间出现的单点或连续几点的噪声，中值滤波器可以很好的进行过滤。图 8 为一个三阶的中值滤波器。可以看出 P3 点会在采样后，被中值滤波器滤掉。在接近感应的实际应用中，由于采样速率较快往往会出现这样的噪点，中值滤波器可以很好的进行过滤，同时中值滤波器的输出信号也会使得后面的均值滤波器以及 IIR 数字滤波器的输入信号更加稳定。普通的 n 阶中值滤波器的时间复杂度约等于 $n*n$ ，所以其阶数不宜过高，应根据实际的噪声情况进行合理选择。

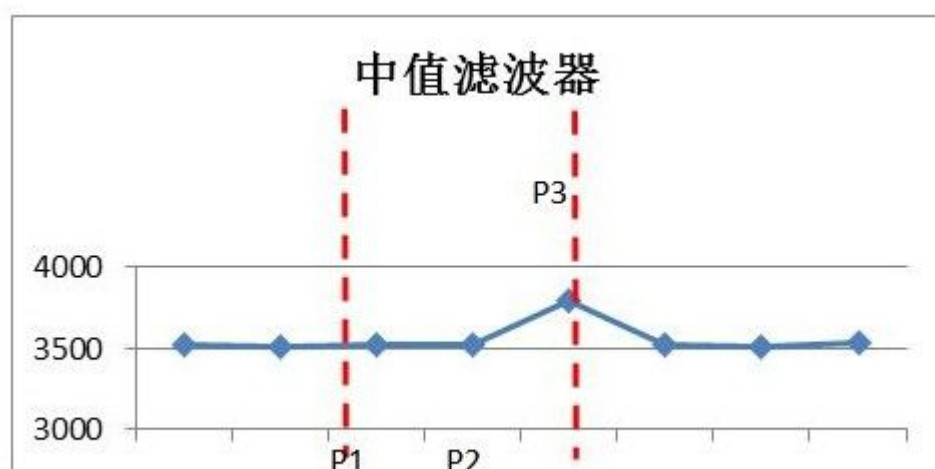


图8 三阶中值滤波器

图 9 对比了实际采集的电容变化信号在使用中值滤波器前后的差异。红色为使用中值滤波器前的信号，蓝色为经过中值滤波器（三阶）的信号。

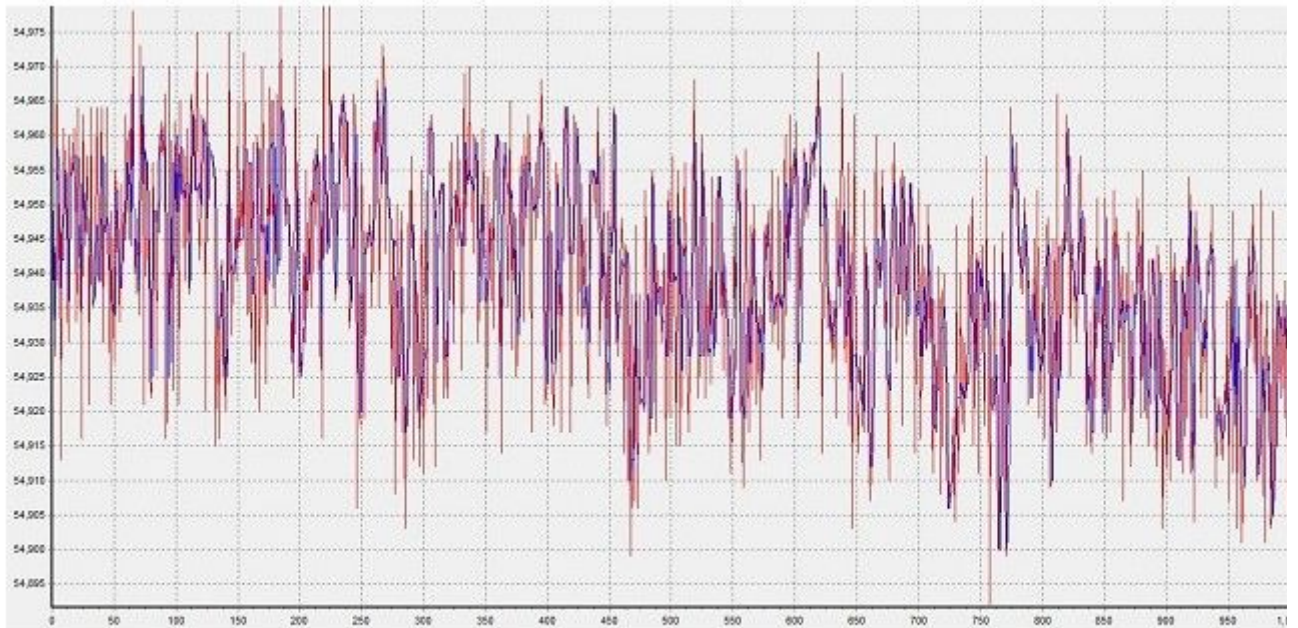


图9 中值滤波器输入输出信号对比

2. 均值滤波器

均值滤波器则采用了对一组采样数据取平均值得方法来提高信噪比。均值滤波器会使信号的幅值更加稳定，也就会使 IIR 数字滤波器的输入更加稳定，相位偏差更小。但均值滤波器阶数的增加会使得接近感应的检测响应时间增加。图 10 对比了信号在使用均值滤波器前后的差异。红色为使用均值滤波器前的信号，蓝色为经过均值滤波器（四阶）的信号。

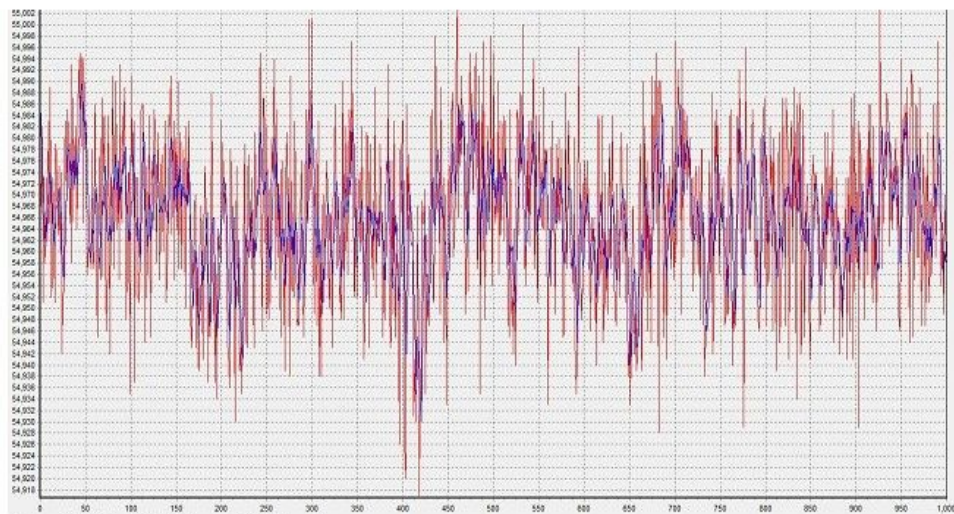


图10 均值滤波器输入输出信号对比

3. IIR 数字滤波器

IIR 数字滤波器具有反馈，一般认为是无限的脉冲响应。同时 IIR 数字滤波器的幅频特性精度很高，但相位不是线性的。也就是说在使用 IIR 数字滤波器的时候会使信号更加平滑，但同时会带来延时，造成整个系统的实时性有所下降。图 11 描述了 IIR 数字滤波器的原理。

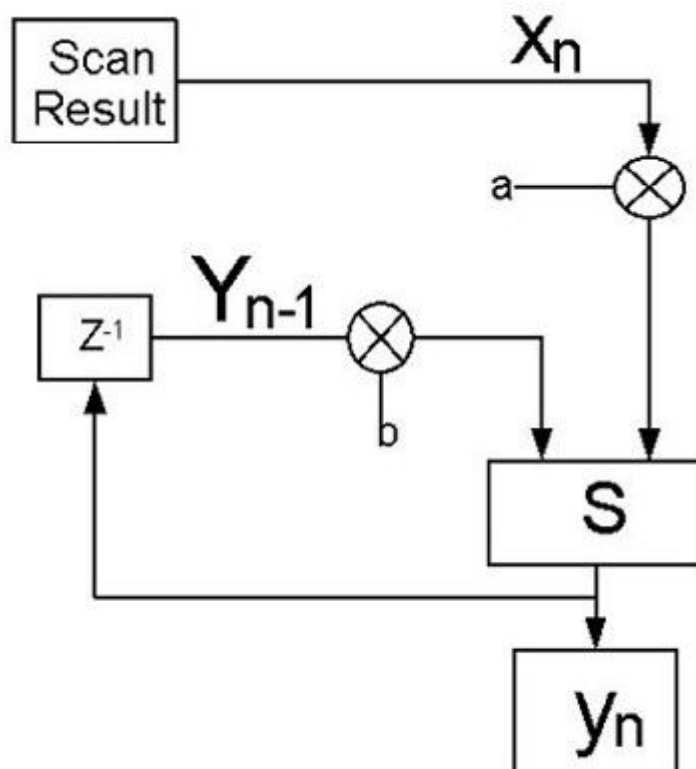


图11 IIR数字滤波器原理

IIR 数字滤波器在接近感应的应用中尤为重要，因为接近感应需要极高的灵敏度，所以信号需要十分的稳定和平滑。尽管 IIR 数字滤波器会对整个系统的响应造成一些延时，但由于资源的限制，软件滤波只能采用这种方式。在图 11 中， $y_n = a * y_{n-1} + b * x_n$ ，对于系数 a 和 b 的选择，本文经过了大量的数据仿真，还在此基础上使用了 Cypress 专利，实现了动态调整系数 a 和 b ，使得整个系统的响应延时得到了明显的降低。

图 12 对比了信号在使用 IIR 数字滤波器前后的差异。红色为使用 IIR 数字滤波器前的信号，蓝色为经过 IIR 数字滤波器的信号。从图中可以明显地看出，经过 IIR 数字滤波器后的信号变得更加平滑，但同时也产生了一定的延时。

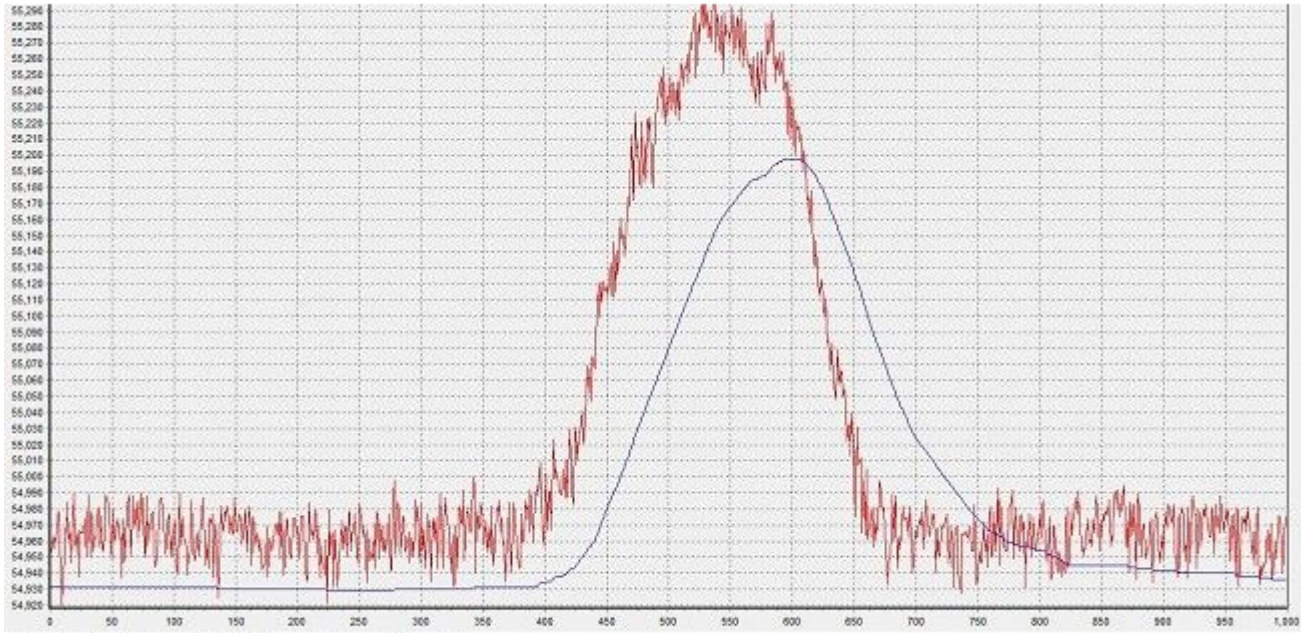


图12 IIR数字滤波器输入输出信号对比

信号处理

在处理信号的过程中，为了保证更大的信噪比，需要处理好信号与噪声，图13列出了信号与噪声。同时为了保证信号能够适应温度等外界条件的变化，在信号处理中引入了基线这一机制。所有的信号都是以基线为基准，同时基线随着外部环境的变化进行更新。更新的原则是，当信号小于噪声的水平时，基线进行更新，一旦信号大于噪声的水平，基线便不再更新。

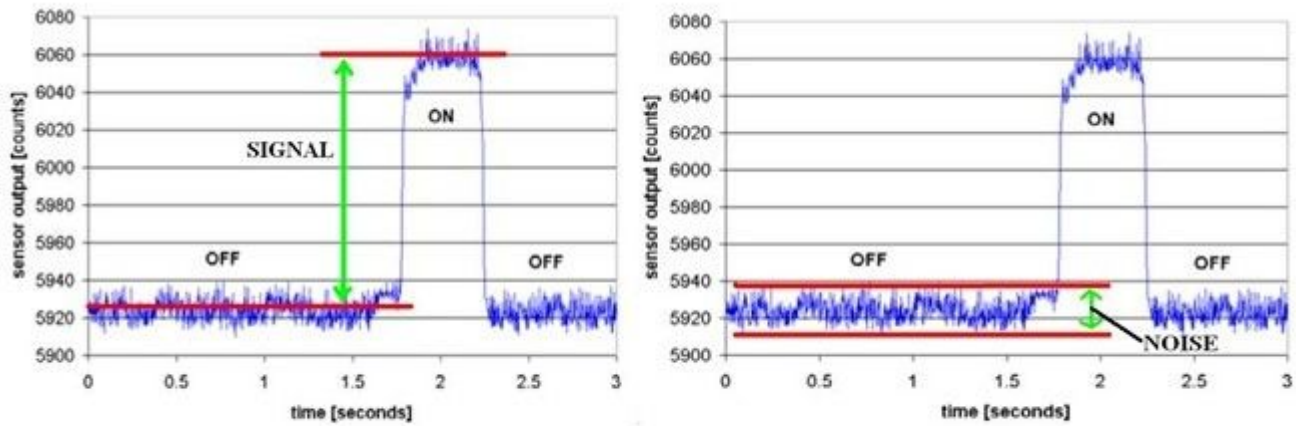


图13 接近感应系统中的信号与噪声

状态判断

在距离感应的实际应用中，由于不同客户有着不同的需求，所以在对于整个状态机的处理需要遵循几个原则：1. 保证检测的可靠性。2. 在各种限定条件下保证检测成功率最高。3. 尽量短的响应时间。

总结

本文设计的电容式接近感应探测系统具有结构简单、成本低、易于调试和量产等优点，同时在探测距离、反应速度、稳定性等方面也具有较高的性能。该设计在知名客户的智能手机中已经实现大规模量产，探测距离接近 17mm，响应速度的典型值是 70ms，并且通过了严格的 ESD、EMC、温度等测试，实现了客户替换 IR 传感器的目标。