

文章编号:1007-2780(2017)01-0023-06

采用稀疏读出策略的电容触摸屏前端 IC 设计

李 博*, 魏廷存, 魏晓敏

(西北工业大学 计算机学院 微电子学研究所, 陕西 西安 710072)

摘要:针对采用触摸预测和窗口采样(TPWS)稀疏读出策略实现的电容触摸屏系统容易受到显示噪声和充电器噪声干扰的问题,本文提出了并行互补驱动和差分感应的方法以提高系统的信噪比。基于本文提出的并行驱动和差分感应方法,并结合 TPWS 系统的特点,采用 0.35 μm CMOS 工艺设计实现了一个 48 通道电容触摸屏模拟前端 IC,并设计了一个 11.6 in 原型触摸屏系统用于评估该 IC 的性能。测试结果表明,本文设计的 IC 不仅能满足 TPWS 系统对于点测量和线测量的功能需求,并且系统的信噪比从原来的 25.0 dB 提升到了 35.8 dB。

关键词:电容触摸屏;模拟前端 IC;稀疏读出;并行互补驱动;差分感应

中图分类号:TP394.1;TH691.9 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20173201.0023

Design of analog front-end IC for capacitive touch screen using sparse readout strategy

LI Bo*, WEI Ting-cun, WEI Xiao-min

(School of Computer Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University,
710072 Xi'an, China)

Abstract: Capacitive multi-touch screens using touch predicting and window sensing (TPWS) readout strategy are susceptible to display noise and charger noise interferences. In this paper, a parallel complementary driving and differential sensing method are proposed to improve the SNR of TPWS system. A new 48-channel analog front-end IC is designed and realized using 0.35 μm CMOS process based on the parallel complementary driving and differential sensing method. In addition, an 11.6 in prototype touch screen system is designed to evaluate the performances of the analog front-end IC. The measurement results indicate that, the analog front-end IC designed in this paper can satisfies the requirements of TPWS system for line and point scanning, and furthermore, the SNR of the TPWS system is increased from 25.0 dB to 35.8 dB.

Key words: capacitive touch screen; analog front-end IC; sparse readout; parallel complementary driving; differential sensing

收稿日期:2016-07-11;修订日期:2016-09-13.

基金项目:2015 陕西省科技计划统筹项目(No.2015KTZDGY03-03)

Supported by Project of Science and Technology Planning in Shaanxi Province(No.2015KTZDGY03-03)

* 通信联系人, E-mail: libowxm@foxmail.com

1 引言

由于电容触摸屏具备多点识别能力、较高的透光率以及良好的用户体验等优点,被广泛应用于智能手机、平板电脑、可穿戴设备等移动终端产品中。对于面向移动终端应用的电容触摸屏系统,低功耗和低成本设计至关重要,这有利于延长移动终端产品的电池续航能力以及提升产品的市场竞争力。

在传统的电容触摸屏系统中,为了实现多个触摸点检测和精确的触摸点中心坐标计算,需要逐帧采集整个电容触摸屏的完整互电容图像,然后通过对采集到的互电容图像进行数据处理,以检测触摸事件的发生并计算出触摸点坐标^[1]。基于这种完整互电容图像采集和处理策略实现的多点触摸屏系统,需要采集和处理的数据量与触摸屏面板上横向电极数与纵向电极数的乘积(电极交叉点的数量)成正比。随着电容触摸屏的尺寸增大或分辨率提高,横向和纵向的电极数也相应增加,导致需要读出和处理的数据量急剧增加。为了不影响触摸屏系统的响应速度,通常需要提高模拟前端读出和数据处理硬件的速度或并行度来增加系统带宽,这将导致系统的成本和功耗大幅度增加。

实际应用中,触摸屏上同时存在的触摸点相对于触摸屏上的电极交叉点数具有稀疏性特点^[2]。基于触摸的这种稀疏性特点,在文献[3]中,我们提出并设计了一个采用触摸预测和窗口采样(TPWS: Touch Predicting and Window Sensing)策略的多点触摸屏系统。在该系统中,充分利用了实际触摸的稀疏性特点,对数据进行稀疏采样,使得需要采集和处理的数据量不依赖于触摸屏上电极交叉点的数目,而仅依赖于实际的触摸点数目,因此数据采集和处理的规模大幅度减小。通过采用 TPWS 策略,可降低对系统硬件带宽的要求,从而减少硬件资源开销和功耗,这使得设计低成本、低功耗的触摸屏系统成为可能。

在文献[3]中,我们同时也设计和实现了一个基于 TPWS 策略的 48 通道模拟前端 IC,并采用该 IC 设计了一个原型电容触摸屏系统。实验结果表明,系统工作时的动态功耗仅为 65 mW,每

通道芯片面积为 0.087 mm²,所设计的模拟前端 IC 具有低功耗和小面积的优点。然而,由于在该模拟前端 IC 设计时重点考虑的是 TPWS 系统的功能实现,对系统使用时的噪声干扰问题考虑较少,导致该系统的信噪比(SNR)较低,造成触点坐标的计算精度下降,同时系统稳定性变差。

为了提高系统的信噪比,我们改进了 TPWS 系统的模拟前端 IC 设计。本文设计的模拟前端 IC 中,采用并行互补驱动和差分感应技术实现了 TPWS 系统的线扫描和点扫描功能,使系统的 SNR 提高到了 35.8 dB。另外,我们还采用新设计的模拟前端 IC 设计实现了一个 11.6(1 in=2.54 cm)原型触摸屏系统,并给出了系统的测试结果。

2 设计考虑

图 1 所示为基于预采样和部分互电容图像采集的 TPWS 稀疏采样策略。在 TPWS 系统中,单帧的触摸检测过程被分成两个步骤来完成,第一步使用低分辨率预采样方法估计可能的触摸点,并确定出触摸屏上可能需要采样的区域。第二步对可能存在触摸点的区域进行局部互电容图像采集和处理,以计算精确的触摸位置坐标。如图 1 所示,假设触摸屏上同时存在两个触摸点。为了检测到触摸点,先对触摸屏横向电极和纵向电极进行逐条线扫描,由于触摸会导致电极信号发生变化,用两个向量 V_x

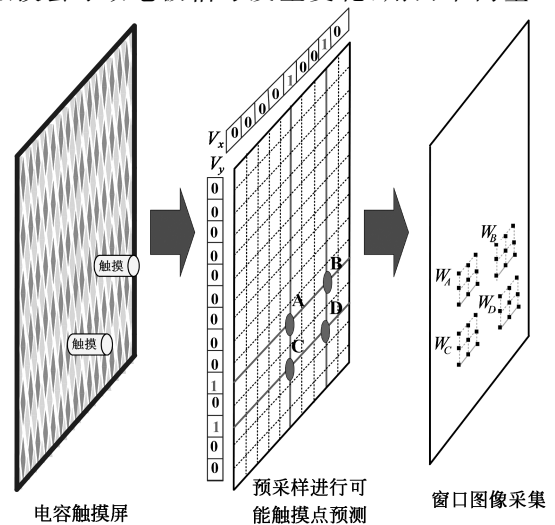


图 1 基于预采样和部分互电容图像采集的 TPWS 策略

Fig. 1 Touch prediction and window sensing multi-touch sensing strategy

和 V_y 分别标记横向和纵向电极信号的变化,其中0表示未被触摸的电极,1表示被触摸的电极。 V_x 和 V_y 中同时被标记为1的电极交叉点处,即为可能被触摸的区域。以 V_x 和 V_y 估计的可能触摸点(图1中用A、B、C、D表示)为中心,可以扩展出四个采样窗口区(图1中用 W_A 、 W_B 、 W_C 、 W_D 表示),然后采集这四个窗口区内的部分互电容图像,并使用子像素插值算法即可计算出触摸点的精确坐标^[4]。

为了实现TPWS策略,需要克服诸多设计挑战。第一,设计的模拟前端电路需要适应TPWS系统混合使用线测量和点测量方法带来的输入范围大且不确定的问题;第二,预采样时对横向和纵向电极分别扫描所导致的显示噪声抑制问题。以上两个设计挑战我们已经在文献[3]中讨论过,并得到有效解决。为了进一步提高系统的信噪比,本文中我们将重点关注和克服另外两个设计挑战:一是现在流行的轻薄显示/触摸堆叠工艺和单层ITO^[5-6]电极设计导致的显示屏噪声对触摸屏的干扰问题;另一个是充电器噪声对触摸屏的干扰问题^[7]。显示屏的强耦合干扰和充电器的宽频干扰是影响TPWS系统信噪比的两个重要因素。

对于具有两层ITO电极的触摸屏系统,传统的信号检出策略是:为了减少显示噪声的干扰,通常将靠近显示屏的电极层作为驱动电极,而将远离显示屏的电极层作为感应电极使用。由于驱动电极的屏蔽作用以及感应电极与显示屏之间的距离较大,触摸屏与显示屏之间的耦合干扰较小。而在TPWS信号检测策略中,预采样时需要分别对横向和纵向电极进行线扫描,这就要求靠近显示屏的电极层既要作为驱动电极又要作为感应电极使用(上下两层ITO电极均需既作为驱动电极又作为感应电极使用),当靠近显示屏的电极层作为感应电极使用时,触摸屏与显示屏之间的耦合干扰变大。另外,现在的触摸屏设计趋势是使用单层互补图案电极取代两层交叉ITO电极,以及使用更轻薄的显示/触摸堆叠工艺,以使得整个触摸屏的厚度减小,从而达到电子产品轻薄化的目的^[8]。这种趋势将使得触摸屏和显示器贴合得更紧密,而且无法使用单独的电极层作为驱动电极

以屏蔽显示噪声。因此,对于TPWS信号检出策略以及单层ITO电极触摸屏系统,必须抑制上述显示噪声干扰。

充电器噪声类似于一种宽频共模干扰噪声。当使用充电器进行充电时,充电器的两个输出端相对于大地有一个共模波动,而人体相对于大地是静止的,当稳定的“人体”触摸了“波动”的电子设备时,会导致电荷在触摸点位置的流动,形成了充电器噪声对触摸信号的干扰^[9]。

显示噪声是一种低频共模噪声,通常可以使用差分测量的方法来抑制。而充电器噪声的频谱较宽,抑制较为困难,提高信噪比的方法就是提高驱动信号的功率。通常可以通过提高驱动信号的电压或使用并行驱动的方法来增加驱动信号的功率,为了不增加IC设计的复杂度,我们采用并行驱动的方法以提高驱动信号的功率。

3 电路设计

图2所示为本文设计的模拟前端电路结构框图。该电路采用可编程配置结构,通过采取并行互补驱动和差分感应的方法来提高TPWS系统的信噪比。如图2所示,电容触摸屏面板(TSP)的每条横向或纵向电极均与一个4选1模拟多路开关连接,通过对4选1模拟多路开关的编程配置,可以将每条电极连接到信号驱动通路(正向/负向驱动线)或信号感应通路(感应线+/-),从而可按照需要将每条电极定义为驱动电极或感应电极。测量过程中所需要的正向/负向驱动信号是一组极性互补的信号,由激励发生器按照控制时序产生。整个模拟前端电路使用一个电容量化器电路来实现信号的测量与数字化。电容量化器使用一个电压比较器测量两条感应线+/-上的电压大小关系,使用一个可编程电容阵列(PCA)补偿两条感应线+/-之间的电容差。基准电压生成电路产生的基准电压 V_{ref} 用于对与感应线+/-连接的电容器进行电荷重置。逐次逼近控制器接收比较器的输出,并以该输出为依据,调节可编程电容阵列的权重,以补偿两条感应线+/-之间的电容差,最终通过 N 次逐次逼近过程使两条感应线+/-之间的电压达到平衡。

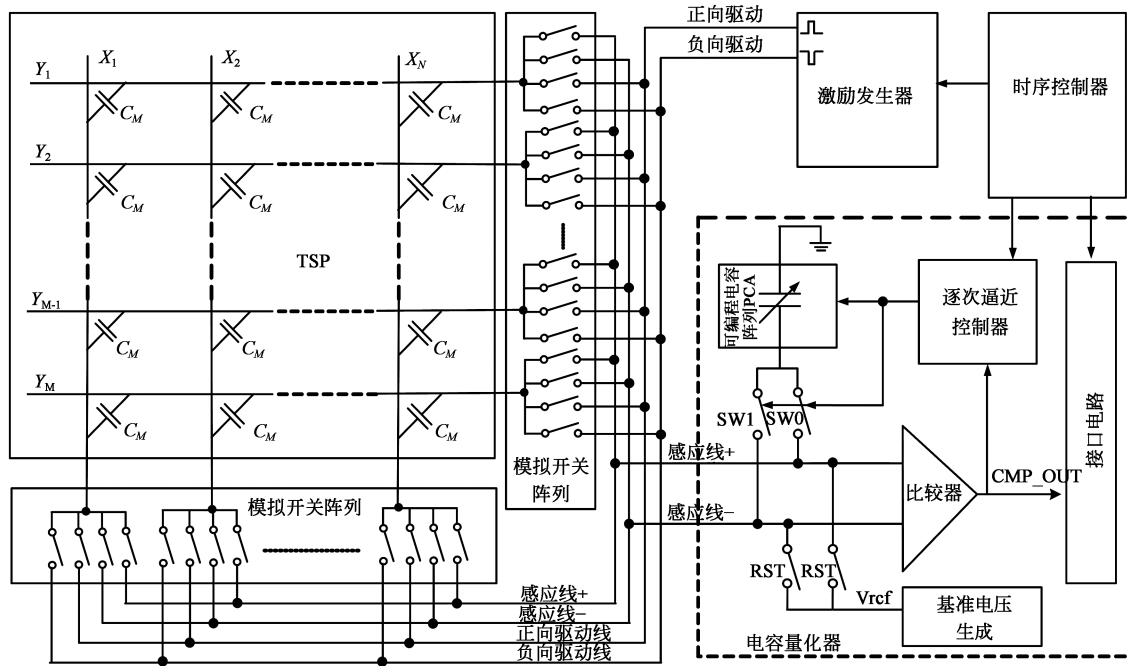


图 2 模拟前端电路的结构框图

Fig.2 Architecture of analog front-end circuits

图 3 所示为模拟前端电路的工作时序。模拟前端电路的输出结果是 1 位符号位和 N 位幅值数据, $N+1$ 位的数据输出需要 $N+2$ 个量化周期。每个量化周期分为两个子步骤: 步骤 1 是电荷重置过程, 此时正向/负向驱动信号分别固定在低/高电位, 感应线+/-与选定的需要进行差分测量的电极相连接, 基准电压 V_{ref} 通过闭合的 RST 开关对与感应电极相连接的电容器进行充电。步骤 2 是电荷转移过程, 此时正向/负向驱动信号分别产生正向和负向的阶跃信号, 使得预先被存储

在感应电极电容器中的电荷重新分配, 从而使感应线+与感应线-之间产生电压差, 该电压差正比于两条差分感应电极的电容差, 从而将感应线+/-之间的电容差转换成电压差。 $N+2$ 个测量周期分配如下: 周期 1 是符号位测量周期, 此时 SW1 和 SW0 均打开, PCA 与感应线断开, 比较器输出的符号位测量结果标示了需要进行电容补偿的感应线。周期 2~ $N+2$ 是幅值测量过程, 测量结果代表感应线+与感应线-之间的电容差。在周期 2, PCA 被设置为初始位权 ($1/2 \times PCA$ 全

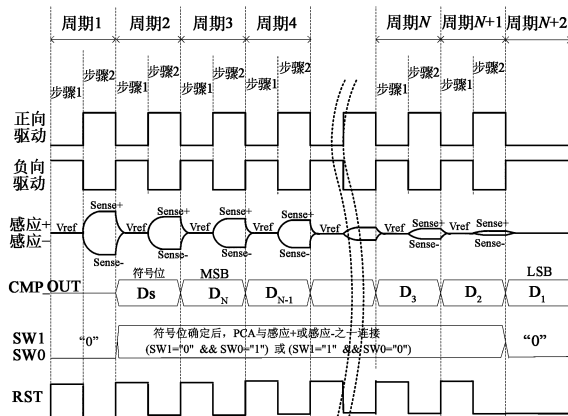


图 3 模拟前端电路的工作时序

Fig.3 Timing of front-end circuits

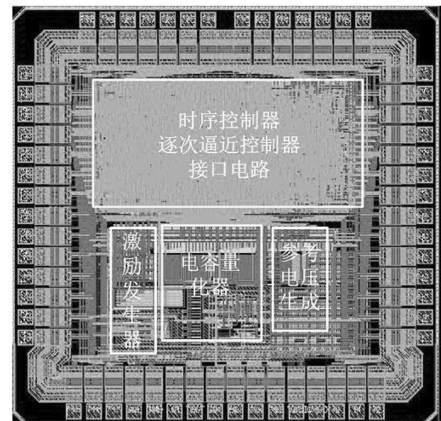


图 4 电容触摸屏模拟前端 IC 的版图

Fig.4 Layout of the front-end IC

量程);在周期 $3 \sim N+1$, PCA 的位权设置=当前 PCA 电容值 $+(-1)^{\text{CMP_OUT}} \times 1/2^{n-1} \times \text{PCA 全量程}$ (n 代表正在测量的周期,取值 $3 \sim N+1$);周期 $N+2$ 为最低幅值位输出周期。

图4所示为本文设计和实现的触摸屏模拟前端IC的版图。该模拟前端IC集成了48个可编程测量/驱动通道,48个测量通道共享一个电容量化器和一个激励发生器。该IC采用 $0.35 \mu\text{m}$ 5V CMOS工艺制造,芯片面积为 5.29 mm^2 。

4 测试结果

为了评估上述电容触摸屏模拟前端IC的性能,我们设计和实现了一个11.6 in 电容触摸屏原型系统,如图5所示。该电容触摸屏拥有35条横向电极和20条纵向电极,因此使用两颗48通道模拟前端IC分别控制横向和纵向电极。使用一个主处理器控制两颗模拟前端IC的工作以及完成采集数据的处理。



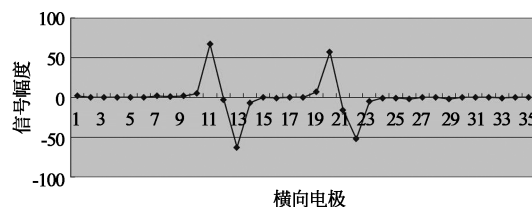
图5 电容触摸屏原型系统

Fig.5 Prototype test system

图6给出了线扫描和点扫描的测试结果。图6(a)是采用并行驱动和差分感应的方法对35条横向电极进行线扫描的结果,可以看出电极11、12、13和电极20、21、22是被触摸的电极。图6(b)是采用并行驱动和差分感应的方法对20条纵向电极进行线扫描的结果,可以看出电极9、10、11和电极14、15、16是被触摸的电极。由图6(a)和图6(b)所确定的触摸电极交叉点,即为可能的触摸区域(采样窗口区)。图6(c)为4个可能窗口区内采集的差分互电容图像。使用子像素插值

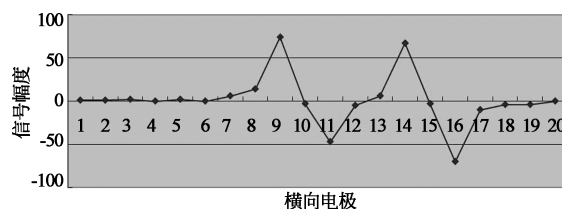
算法,即可计算出触摸区域的中心坐标。

与文献[3]相比,由于本文采用了并行驱动和差分感应的方法,点测量的SNR有显著改善,由原来的25.0 dB提高到35.8 dB;10点触摸应用时测试系统动态消耗电流12.8 mA,功耗有所下降。



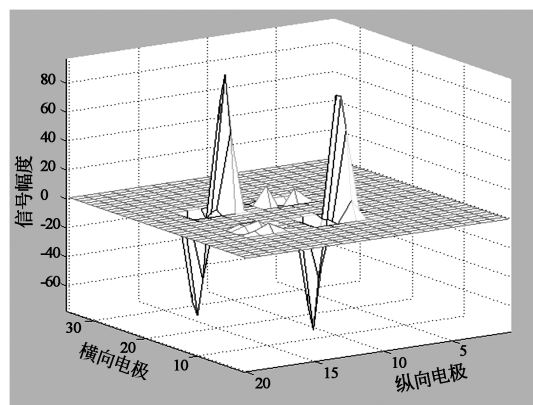
(a) 横向电极的线扫描结果

(a) Line sensing results in row direction electrodes



(b) 纵向电极的线扫描结果

(b) Line sensing results in column direction electrodes



(c) 窗口区的差分测量互电容图像

(c) Differential point sensing results in window region

图6 线扫描和点扫描的测试结果

Fig.6 Line sensing and point sensing results

5 结论

本文针对采用TPWS信号读出策略的多点电容触摸屏系统,提出了并行互补驱动和差分测量的方法,以抑制显示噪声和充电器噪声的干扰,从而提高了系统的信噪比。基于以上方法,设计

并实现了一款 48 通道模拟前端 IC,并通过一个 11.6 in 的原型电容触摸屏系统对所设计的 IC 性能进行了测试和评估。测试结果表明,本文所设

计的模拟前端 IC 能满足 TPWS 系统对于点测量和线测量的功能需求,并且系统的信噪比也从原来的 25.0 dB 提升到了 35.8 dB。

参 考 文 献:

- [1] BARRETT G, OMOTE R. Projected-capacitive touch technology [J]. *Information Display*, 2010, 26(3): 16-21.
- [2] LUO C C, BORKAR M A, REDFERN A J, *et al.* Compressive sensing for sparse touch detection on capacitive touch screens [J]. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 2012, 2(3): 639-648.
- [3] LI B, WEI T C, WEI X M, *et al.* A touch prediction and window sensing strategy for low-power and low-cost capacitive multi-touch screen systems [J]. *Journal of Display Technology*, 2016, 12(6): 646-657.
- [4] AKHTAR H, KAKARALA R. A methodology for evaluating accuracy of capacitive touch sensing grid patterns [J]. *Journal of Display Technology*, 2014, 10(8): 672-682.
- [5] 赵亚丽,马富花,江波,等. ITO/Ag 光子晶体薄膜的制备及性能[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(6): 1516-1522.
ZHAO Y L, MA F H, JIANG B, *et al.* Preparation and properties of ITO/Ag photonic crystal thin films [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(6): 1516-1522. (in Chinese)
- [6] 孙杨,张永栋,朱燕林. 单层 ITO 多点电容触摸屏的设计[J]. *液晶与显示*, 2010, 25(4): 551-553.
SUN Y, ZHANG Y D, ZHU Y L. Design of single layer ITO capacitive touch panel [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2010, 25(4): 551-553. (in Chinese)
- [7] CAREY J. Noise Wars: Projected Capacitance Strikes Back [EB/OL]. Cypress Semiconductor Corp, (2012-09-05) <http://www.cypress.com/documentation/white-papers/noise-wars-projected-capacitance-strikes-back>.
- [8] HO T K, LEE C Y, TSENG M C, *et al.* Simple single-layer multi-touch projected capacitive touch panel [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2009, 40(1): 447-450.
- [9] KLEIN H W. White Paper: Noise Immunity of Touchscreen Devices [EB/OL]. Cypress Semiconductor Corp, (2013-02-25) <http://www.cypress.com/documentation/white-papers/noise-immunity-touchscreen-devices>.

作者简介:李博(1981—),男,陕西宝鸡人,博士研究生,2007 年获得西北工业大学硕士学位,研究方向为电容传感器技术,混合信号集成电路设计。E-mail: libowxm@foxmail.com