

상호 정전용량 터치 방식에서 높은 SNR 특성을 갖는 AFE 설계

김상헌*, 손상희**

AFE Design with High SNR Characteristics in Mutual Capacitive Touch Method

Sang-Heon Kim*, Sang-Hee Son**

본 연구는 IDEC에서 EDA Tool을 지원받아 수행하였습니다

요 약

TSP(Touch Screen Panel)의 기술 중 상호 정전용량 방식은 고해상도인식이 가능하고, 멀티터치와 소형화를 할 수 있다는 장점으로 모바일 디바이스 등에 널리 사용하고 있다. 그러나 패널두께를 줄이거나 큰 면적의 패널을 사용하게 되면서 기생성분이 증가하였다. 기생성분에 의해 감쇄된 신호를 감지하는 터치센서는 고감도로 인식하기 어려움이 있다. 또한 TSP와 AFE에 생성되는 잡음으로 인해 센서에 신호의 왜곡으로 인한 정보손실 및 오류를 발생시킨다. 본 논문에서는 제안하는 LPF를 이용하여 잡음을 감쇄시키고, 기생성분으로 감쇄된 신호를 증폭시켜 SNR을 향상하는 방법을 제안한다. 제안한 회로는 TSMC 0.18 μ m CMOS 공정으로 설계하였고, Cadence Virtuoso로 검증하였다. 검증 결과 58dB의 SNR과 8.8mW의 저 전력으로 왜곡과 감쇄된 신호를 증폭시켜 터치 감도가 향상됨을 확인하였다.

Abstract

Among the technologies of TSP(Touch Screen Panel), the mutual capacitive method is widely used in mobile devices due to the advantage of high-resolution recognition and multi-touch and miniaturization. However, parasitic components increased as the thickness of the panel was reduced or large-area panels were used. It is difficult to recognize a touch sensor that senses a signal attenuated by a parasitic component with high sensitivity. In addition, noise generated in TSP and AFE causes information loss and errors due to signal distortion in the sensor. This paper proposes a method of improving SNR by attenuating noise using the proposed LPF and amplifying signals attenuated with parasitic components. The proposed circuit was designed with the TSMC 0.18 μ m CMOS process and verified with Cadence Virtuoso. As a result of the verification, it was confirmed that touch sensitivity was improved by amplifying distorted and attenuated signals with an SNR of 58dB and a low power of 8.8mW.

Keywords

fully differential amplifier, low pass filter, mutual capacitance, signal-to-noise ratio

* 청주대학교 반도체공학과 석사과정
- ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6541-5930>
** 청주대학교 반도체공학과 교수(교신저자)
- ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4392-066X>

• Received: Jul. 11, 2023, Revised: Aug. 16, 2023, Accepted: Aug. 19, 2023
• Corresponding Author: Sang-Hee Son
Dept. of Semiconductor Eng., Cheongju University, Korea
Tel.: +82-43-229-8464, Email: shson@cju.ac.kr

1. 서 론

TSP(Touch Screen Panel)를 구현하는 방식 중 하나인 상호 정전용량 방식[1]-[3]은 다른 방식에 비해 높은 내구성과 투과율, 소형화와 멀티터치 기능[4]을 수행할 수 있어 대부분의 모바일 디바이스들이 채택하고 있다. 모바일 디바이스는 상호 정전용량 방식을 적용하여 최적화하기 위해 무게감소, 배터리 공간 확보, 플렉서블 디스플레이에 활용하기 위해 지속적인 개발을 하였다. 따라서 디바이스의 성능을 높이고, 제조원가를 낮추기 위해 TSP 두께를 감소시키는 개발을 한다. 하지만 두께를 감소시킬수록 디스플레이 패널과 TSP 사이의 간격이 가까워져 두 사이에 원치 않는 기생성분이 증가하게 된다. 또한 디스플레이의 면적이 증가하면 고해상도 동작을 위해 송·수신 채널의 수를 증가시키는데 각 채널은 간섭이 발생하여 기생 R과 C가 생성된다. 따라서 TSP의 구동 전극(Tx)에서 인가한 신호는 기생성분에 의해 감쇄되고, 수신 전극(Rx)은 감쇄된 신호를 감지하는 문제가 생긴다[5]. 터치센서의 성능저하로 TSP 외부에 발생하는 SMPS(Switching Mode Power Supply), Hum, Display 잡음과 AFE(Analog Front End) 내부에 OTA(Operational Transconductance Amplifier), 기준전압, 스위칭 잡음 등이 존재한다. 위 잡음들은 터치센서의 신호 이외의 잡음이 함께 전달되면서 신호의 왜곡이 발생할 수 있다.

본 논문에서는 기생성분에 의해 감쇄된 신호를 보완하여 고감도로 동작할 수 있도록 기존 AFE에서 증폭을 가진 BPF(Band Pass Filter)로 감쇄된 신호를 증가시키고, 동시에 잡음으로부터 신호 왜곡을 방지할 수 있도록 SNR을 향상시키는 상호 정전용량 방식의 AFE를 새롭게 제시하고자 한다.

II. 기존 상호 정전용량 방식 문제점

아래 그림 1은 상호 정전용량 방식의 대표적인 다이아몬드 패턴의 TSP 구조이다[6]. 터치 감지 원리는 구동 신호가 인가된 TSP는 Tx에서 Rx방향으로 전기장이 형성되어 Cm(Mutual capacitance)을 갖는다. 비접촉 상태일 때는 일정 정전용량인 Cm이지만 다른 유전체를 가진 물체가 Cm에 접촉하게 되

면 전기장이 접촉한 유전체로 일부 흡수가 되어 Cm이 일부 감소하게 된다. Cm의 변화량을 ΔC_m 으로 표시하면 Rx에 Cm이 접촉하게 되었을 경우 $C_m - \Delta C_m$ 를 감지하여 TSP의 터치 유무를 판단한다.

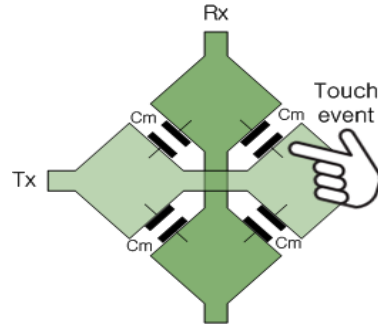


그림 1. 상호 정전용량 TSP
Fig. 1. Mutual capacitive TSP

Mutual Capacitive 방식의 TSP 구조는 Tx와 Rx의 전극이 각각 ITO(Indium Tin Oxide) 필름으로 구성 되어있고, 두 전극 사이와 최상층의 Glass 층 사이는 광학 점착 필름(OCA, Optically Clear Adhesive)층으로 구성된다. TSP의 원가절감과 두께 감소를 위한 방법으로 ITO와 OCA 필름이 두께를 줄이는 방법을 이용한다. 하지만 TSP가 얇아질수록 Tx와 Rx의 간격이 좁아져 커패시턴스(C_m)는 식 (1)과 같이 두 패널의 간격에 반비례하여 증가하게 된다.

$$C = \epsilon \times \frac{A}{d} \tag{1}$$

ϵ 는 유전율, A는 면적, d는 두 전극 간의 간격이다. 전극의 간격이 좁아지면 C_m 의 변화량은 줄어드는 현상이 발생한다. 그림 2는 두 전극의 거리에 따른 C_m 을 표현하였다. 각 TSP의 Tx와 Rx간의 간격의 관계는 $d_1 > d_2$ 이다. 따라서 면적이 같으면 식 (1)에 따라 $C_{m1} < C_{m2}$ 이다. d_2 와 같이 간격이 좁은 경우, 전체 대부분이 접촉한 물체로 흡수되지 않고 Rx로 전달된다. 센서 접촉으로 변화된 ΔC_m 은 일반 TSP보다 작아지므로 $\Delta C_{m1} > \Delta C_{m2}$ 가 된다. 따라서 패널의 C_m 의 총 변화 비율은 전극 사이가 가까워질수록 식 (2)와 같이 작아지게 된다.

$$\frac{\Delta C_{m1}}{C_{m1}} > \frac{\Delta C_{m2}}{C_{m2}} \tag{2}$$

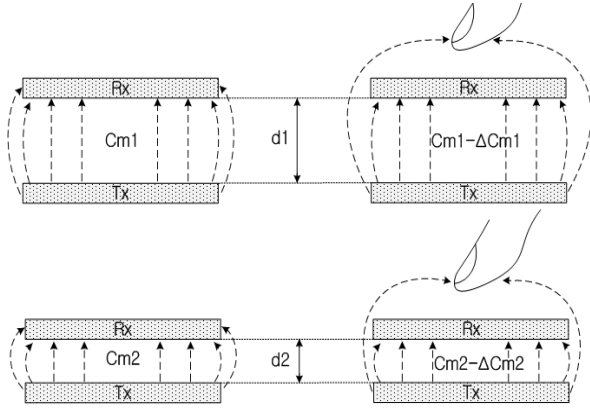


그림 2. 두 전극의 간격에 따른 Cm의 변화
Fig. 2. Changes in Cm according to the spacing of the two electrodes

터치 유무에 따른 신호 변화는 그림 3과 같이 상호 정전용량 방식 TSP의 Rx 채널로부터 전하 증폭기 또는 전하 적분기의 입력단으로 전달된다. CA는 터치패널의 두 전극 사이에 있는 상호 정전용량을 전압의 형태로 감지하는 역할을 한다.

상호 정전용량 방식 터치센서의 AFE는 그림 4로 표현할 수 있다[7]. 회로에서 VTX는 Tx의 구동 신호, Vref는 비반전 입력단의 참조 전압, Cm은 TSP의 Mutual Capacitance, Cf는 피드백 커패시턴스, Rf는 피드백 저항, 그리고 Cp_Tx 및 Cp_Rx는 각 송·수신부의 기생성분이다. 증폭기의 동작은 다음과 같다. 구동 전극의 입력 신호는 펄스를 인가하여 Cm 방향으로 전달한다. VTX로부터 인가받은 반전 입력단의 전하 Q는 식 (3)과 같이 생성된다.

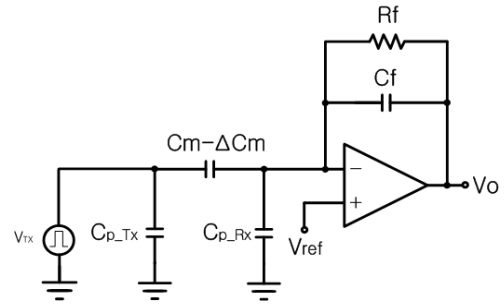


그림 4. 상호 정전용량 방식 AFE
Fig. 4. Mutual capacitive type AFE

$$Q = C_m \times V_{TX} - C_p \times V_{ref} \quad (3)$$

Cp가 없는 이상적인 상태일 때 비접촉 시 VO의 경우, Rx로부터 전하 Q를 전달받은 전하 증폭기의 출력 전압은 식 (4)와 같다.

$$V_{O1} = -\frac{C_m}{C_f} V_{TX} + V_{ref} \quad (4)$$

따라서 CA의 출력 신호는 VTX, Cm에 비례하고, Cf는 반비례한다. 터치센서에 접촉 감지가 되면 Cm의 전기장이 ΔCm만큼 흡수되어 감소한다. 이때 CA는 감소된 Q에 의해 출력 전압에 변화가 일어나며 식 (5)와 같이 나타낼 수 있으며 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

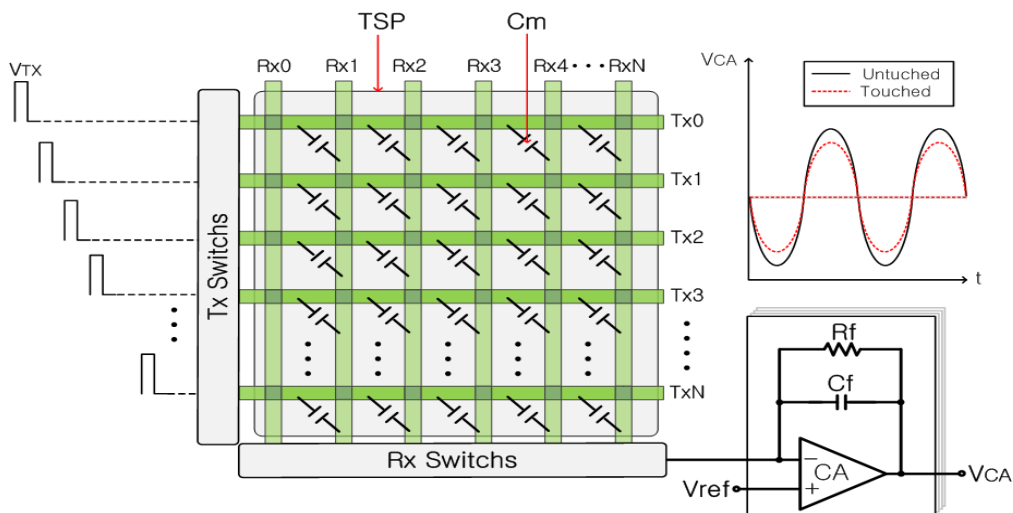


그림 3. 상호 정전용량 방식 TSP와 CA 도식도
Fig. 3. Mutual capacitive TSP and CA schematic diagram

$$V_{O2} = -\frac{(C_m - \Delta C_m)}{C_f} V_{TX} + V_{ref} \quad (5)$$

$$V_{O2} = V_{O1} - \Delta V_{O1} \quad (6)$$

따라서 ΔC_m 에 따른 ΔV_{O1} 은 식 (7)과 같이 정의할 수 있다.

$$\Delta V_{O1} = \frac{\Delta C_m}{C_f} V_{TX} \quad (7)$$

TSP에 기생성분이 존재하게 되면 전체 커패시턴스 성분의 C_m 비율이 낮아져 신호 크기가 이상적인 TSP에 비해 작아지게 된다. TSP의 전하 증폭기는 비접촉과 접촉 시 출력 전압을 식 (8)과 식 (9)로 나타낼 수 있다.

$$V_{O1} = -\frac{C_m}{C_f} V_{TX} + \left(1 + \frac{C_p}{C_f}\right) V_{ref} \quad (8)$$

$$V_{O2} = -\frac{C_m - \Delta C_m}{C_f} V_{TX} + \left(1 + \frac{C_p}{C_f}\right) V_{ref} \quad (9)$$

상호 정전용량인 C_m ($<2pF$)은 ΔC_m ($<200fF$)보다 매우 크기 때문에 전압 비율인 $\Delta V_{O1}/V_{O1}$ 은 1/10보다 작다. 이것은 높은 이득으로 터치 센싱의 변화를 증폭하기 위해 회로에서 가능한 C_f 를 최소 공정으로 설계하여 이득을 키워야 한다. 하지만 공정에서 C_f 를 최소화하기 위한 한계점이 있고, 피드백 커패시터 여러 개를 사용하여 직렬연결로 사용해도 레이아웃 관점에서 칩의 면적이 증가하게 된다. 또한 전하 증폭기는 공급원으로 고전압을 사용해야 한다.

상호 정전용량 방식 TSP의 다이아몬드 패턴은 실제 패널에서는 C_m 뿐만 아니라 패널과 센서를 연결하는 trace line, Tx-Tx 사이와 Rx-Rx 사이 등에 다양한 기생 성분들이 존재한다. 이 성분들은 Tx 관점에서 구동 신호를 감쇄시키며 Rx 관점에서는 감쇄된 신호를 감지하는 문제가 생긴다. 이러한 복합적인 기생성분을 그림 5와 같이 각 채널의 RC 분포모델을 표현할 수 있다. 기생 성분들을 통합하여 Tx와 Rx channel line은 각각 R_p_Tx , C_p_Tx , R_p_Rx , C_p_Rx 로 표현을 할 수 있다.

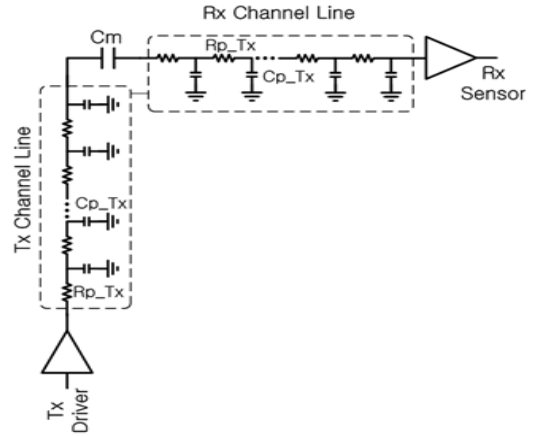


그림 5. Tx-Rx 채널의 기생성분 모델
Fig. 5. Parasitic component model of Tx-Rx channel

상호 정전용량 방식 터치센서는 TSP 외부에서 영향받는 잡음과 AFE 내부에서 영향받는 잡음이 존재한다[9]. 외부 잡음은 TSP와 디스플레이 패널이 인접하여 발생하는 Display 잡음, 교류전원에 의해 생성되는 HUM 잡음, 스위치 동작으로 발생하는 SMPS 잡음 등이 있다. AFE에서 발생하는 잡음은 그림 6과 같이 나타낸다[9].

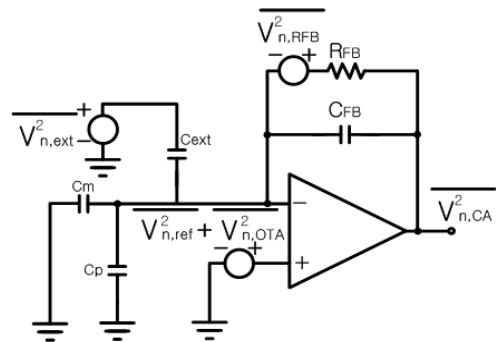


그림 6. AFE의 내부 잡음 모델링
Fig. 6. Internal noise modeling of AFE

$\overline{V_{n,ext}^2}$ 는 커플링 커패시터 C_{ext} 를 통하여 유도된 외부 잡음, $\overline{V_{n,ref}^2}$ 는 CA의 기준전압으로부터 발생하는 잡음, OTA 내부 잡음 $\overline{V_{n,OTA}^2}$, 그리고 참조 전압 잡음 $\overline{V_{n,RFB}^2}$ 등이 발생한다. 터치 센서에는 위와 같이 다양한 잡음이 존재하고 터치센서의 정보손실을 초래하여 센서의 성능이 저하된다. AFE의 출력 참조 잡음은 식 (10)으로 표현할 수 있고, k 상수는 표 1에서 나타내었다.

$$\overline{V_{n,CA}^2} = k_1^2 \overline{V_{n,ext}^2} + k_2^2 \overline{V_{n,ref}^2} + k_2^2 \overline{V_{n,OTA}^2} + k_3^2 \overline{V_{n,RFB}^2} \quad (10)$$

표 1. AFE 잡음 계수
Table 1. AFE noise factor

k1	$\frac{C_{ext}}{C_{FB} + \frac{1}{A_V}(C_M + C_P)}$
k2	$\frac{C_P + C_{FB}}{C_{FB} + A_V(C_P + C_{FB})}$
k3	$\frac{1}{2\pi f R_{FB}(C_{FB} + \frac{1}{A_V}C_P)}$

III. 제안하는 터치 감도 향상 기술

TSP의 기생성분에 의해 터치의 감도가 감소되고, TSP에 유입되는 잡음, CA에서 발생하는 잡음에 대해 대응하기 위한 기술을 제안한다. 그림 7은 터치 센서의 감도를 높이기 위한 AFE 블록이다. 터치 민감도의 향상을 위해 제시한 LPF 구조로 앞 단에 HPF를 설계해서 BPF로 사용한다. BPF로 구동 신호의 주파수대역 외에 저주파 및 고주파 잡음 대역을 차단하여 SNR을 향상시킨 상호 정전용량 방식 터치 센서 AFE를 설계하였다. 기존 방식에서 HPF, 스위칭 모듈레이터, 제안하는 LPF를 추가하였다. Rx를 입력 신호로 동작하는 전하 증폭기(CA, Charge Amplifier)는 터치에 대한 신호를 회로 단에서 사용

하는 신호레벨로 증폭한다. 이후 HPF에서 필터링한 후 LPF를 차동으로 사용하기 위해 스위칭 모듈레이터에서 신호를 각 180° 위상으로 신호를 분리하여 두 개의 신호로 변조한다. 마지막으로 증폭기를 가진 LPF로 필터링하여 잡음 대역을 제외한 신호를 증폭시켜 터치 유무에 따른 신호 변화를 검출한다. 따라서 잡음은 차단하고 터치 센서의 출력 신호는 증폭하여 높은 SNR특성의 AFE를 구현할 수 있다.

기존 CA에서 증폭을 키워도 VREF를 기준으로 출력 전압이 변화하기 때문에 VDD/2로 출력 범위가 제한된다. 낮은 출력 전압 범위로 감지하는 기존 회로를 보완하기 위해 그림 8과 같이 LPF에 사용되는 내부 OPAMP를 FDA(Fully Differential Amplifier)로 설계하면 출력 전압 범위를 GND~VDD까지 증폭할 수 있어 감도 향상을 할 수 있다. 또한, 제안하는 회로는 Active LPF를 사용하여 낮은 CA 단의 이득을 보완해주며, 잡음을 필터링할 수 있는 필터로써 사용할 수 있다. 피드백 경로에 RST 스위치로 증폭 단계가 완료되면 스위치를 ON 하여 신호 차단 및 초기화를 빠르게 동작할 수 있다. 제안하는 회로는 4차 능동형 LPF로 구성된다. 먼저, 단일이득을 가진 HPF로 CA에서 신호를 필터링한 후, SW1와 SW2에 같은 주기, 반대 위상으로 펄스 전압을 인가하여 신호를 변조시키는 스위칭 모듈레이터를 설계하였다. 따라서 HPF의 출력 신호는 0°~ 180°, 180°~ 360° 위상의 VHPF+와 VHPF-가 생성된다.

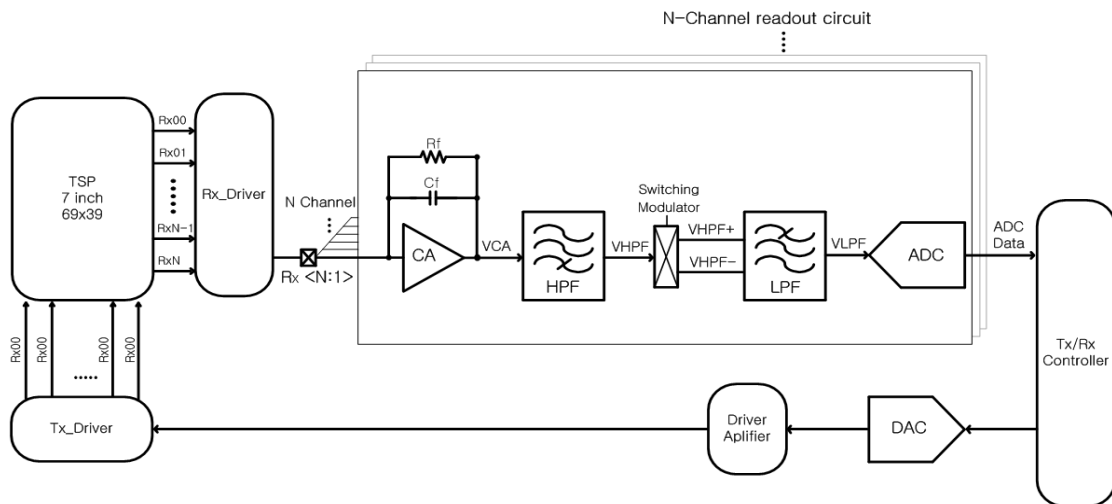


그림 7. 제안하는 AFE 블록 다이어그램
Fig. 7. Proposed AFE block diagram

두 파형으로 변조된 신호는 각각 LPF의 차동 입력단으로 인가된다. 4차 Active LPF는 수동 소자를 제어할 수 있고, 통과 대역의 이득을 식 (11)로 설명할 수 있다.

$$A_{V0} = \frac{R_2}{R_1} \quad (11)$$

따라서 이 능동필터는 통과 대역에 필터 이득을 제공한다. R1으로 이득을 조절할 수 있으며 최대 약 15dB로 증폭할 수 있도록 설계하였다. 제안한 Active LPF는 2단으로 구성되어있어 필요에 따라 고이득을 제공할 수 있다. 따라서 고이득을 위해 추가적인 증폭기를 필요하지 않아 면적을 최소화할 수 있다. 각 A1의 피드백으로 구성한 C1은 상위 Cut-off 주파수 조절을 위한 역할을 한다. 제안한 회로는 HPF와 함께 사용하여 대역 통과 필터로서 기능을 수행하고, 두 개의 차단 주파수를 생성할 수 있다. HPF 또한 4차 Active HPF를 사용하여 각각 ±80dB/decade 기울기의 BPF로서 효율적으로 특정 주파수의 신호만 정류할 수 있는 필터로 사용하여 구동 주파수 이외의 잡음을 억제하여 SNR을 개선할 수 있다.

제안하는 LPF에 사용한 4개의 연산증폭기의 내부 회로는 그림 9와 같다[10]. 각 증폭기의 출력은 다음 단 증폭기의 차동 입력에 사용된다. 감지 회로의 참조 전압의 경우, VDD/2보다 낮게 설정했기 때문에 Rail-to-rail 구조 대신 트랜지스터 M1~M5를 이용한 PMOS 입력 단으로 차동 증폭기를 설계하였

다. 트랜지스터 M6~M9은 증폭기의 CS 단이다. 내부의 연산증폭기는 스위칭 모듈레이터로 변조된 두 개의 신호를 증폭시켜 다음 단의 차동 입력에 전달하므로 완전 차동 증폭기(FDA, Fully Differential Amplifier)로 구현하였다. 공통모드 동작의 안정화를 위해 CMFB(Common Mode Feed Back)를 트랜지스터 M11~M15로 구현하였다. CMFB는 다음과 같이 동작한다. 연산증폭기 입력의 공통모드 전압이 증가하면 차동 증폭 단의 트랜지스터 M8, M9의 게이트 전압이 하강하여 출력 전압 Vo+, Vo-가 증가한다. 증가한 증폭기의 출력 전압을 CMFB의 M11과 M12의 게이트 전압이 증가하게 된다. 따라서 M14의 드레인 단자는 감소하여 M3, M4의 게이트 전압은 Feedback으로 인해 감소하게 되고 M1, M2의 드레인 단자는 증가해서 최종적으로 증폭기의 출력 전압이 일정하도록 유지하게 된다.

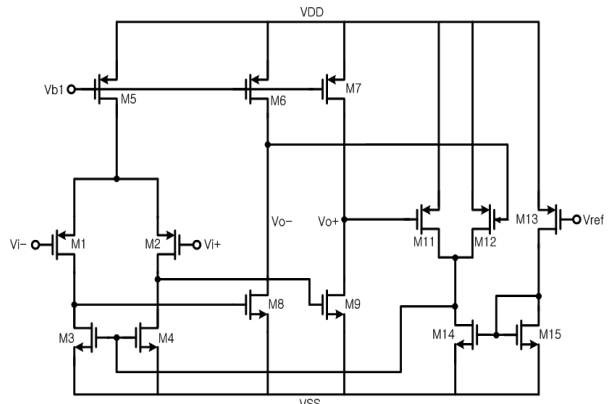


그림 9. 완전 차동 연산증폭기
Fig. 9. FDA(Fully Differential Amplifier)

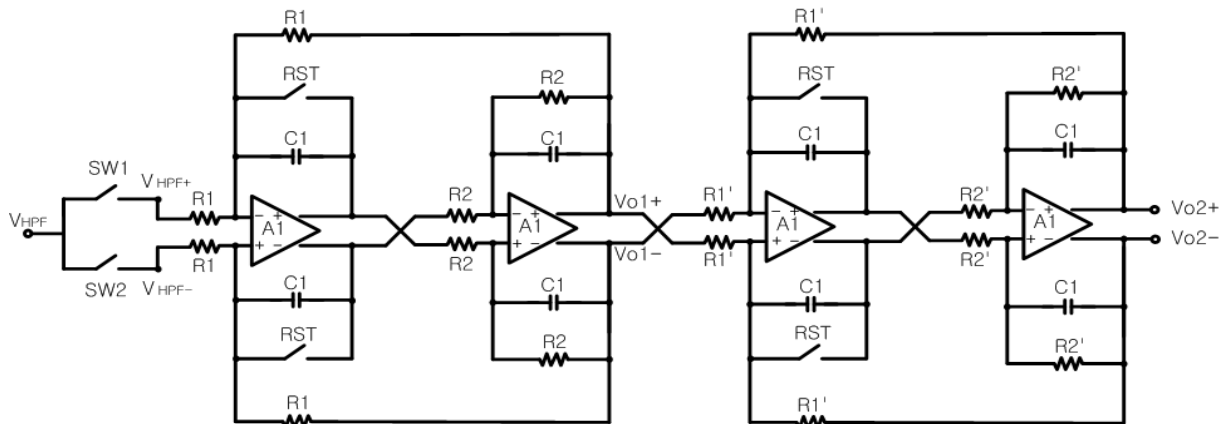


그림 8. 제안하는 완전 차동 4차 LPF
Fig. 8. Proposed fully differential 4-th order LPF

설계한 FDA는 첫째 단에서 고이득을 제공하고 둘째 단은 간단한 공통 소스 단으로 구성해 최대 출력 스윙을 제공하는 2단 opamp를 제공한다. 회로의 각 단의 이득은 $gm_{1,2}(r_{O1,2} \parallel r_{O3,4})$ 와 $gm_{8,9}(r_{O8,9} \parallel r_{O6,7})$ 이다. 따라서 전체 이득은 식 (12)로 나타낼 수 있다.

$$\text{Gain} = g_{m2}(r_{o2} \parallel r_{o4}) \times g_{m9}(r_{o9} \parallel r_{o7}) \quad (12)$$

IV. 제안하는 회로의 구현 및 결과 검토

제안하는 AFE의 검증을 위해 구동 환경을 표 2와 같이 고려하여 시뮬레이션을 진행하였다. TSP와 CA, HPF, 스위칭 모듈레이터, 제안하는 LPF로 구성된 AFE를 설계하였다. 공급 전압은 1.8V를 사용하였고, TSMC 180nm CMOS 공정으로 설계하였으며, 모의실험을 위해 virtuoso spectre를 사용하였다.

표 2. Mutual capacitive AFE 구동 환경
Table 2. Mutual capacitive AFE operating environment

Channels (Tx × Rx)	Tx voltage (V)	Tx freq (KHz)	# of step	Scan rate (us)
20 × 16	12	500	13	26

그림 10은 HPF와 제안한 4차 Active LPF를 사용한 BPF의 전달함수이다. 제안하는 회로는 앞 단이 4차 필터 구조로 설계된 HPF에서 LPF로 전달하기 때문에 BPF로 사용할 수 있다. BPF의 차단 주파수는 253KHz, 741KHz이다. HPF와 LPF를 4차 필터로 구성하였기 때문에 차단 주파수에서 $\pm 80\text{dB/decade}$ 로 설계할 수 있었고, 구동 신호 대역는 통과하면서 저주파 및 고주파 잡음 대역에 상당한 감쇠를 제공하여 SNR을 향상시킨다. 중심주파수인 500kHz 지점에서 약 15dB로 설계를 했기 때문에 효과적으로 터치센서 신호를 증폭할 수 있다.

그림 11은 제안하는 AFE의 각 출력 전압의 과도 응답 결과이다. 20us 동안 감지 동작을 하고, 6us 동안 Reset 동작을 수행하였다. Rx 단에서 터치를 감지하면 CA 단에서 증폭된 터치 신호를 얻는다. 그림 8에서 설명한 VHPF에서 스위칭 모듈레이터를

통해 생성한 VLPF와 같이 Vref 기준으로 $0^\circ \sim 180^\circ$ 위상을 공급받는다. LPF 첫째 단인 Vo1+의 경우 단위 이득으로 설계해서 출력은 정류된 신호만 공급한다. Vo1+가 다음 단에 이득을 가진 LPF를 통해 증폭한 터치 신호를 가진 출력 Vo2+을 측정할 수 있었다.

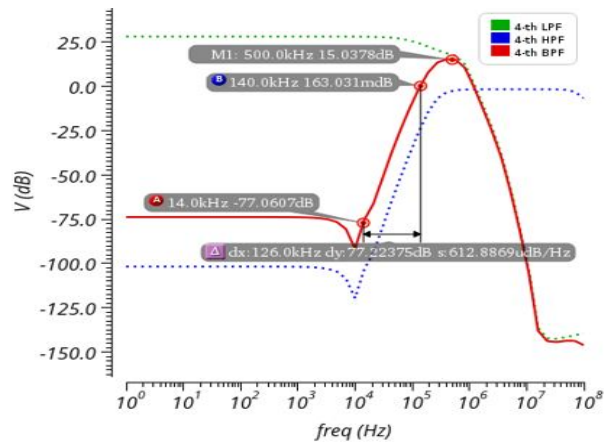


그림 10. 제안하는 AFE의 전달함수
Fig. 10. Proposed AFE transfer function

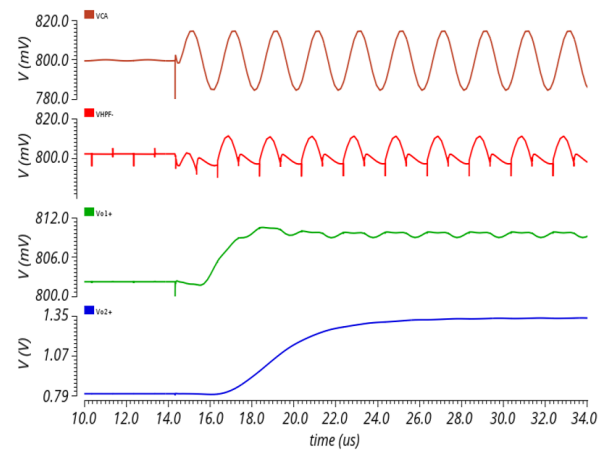


그림 11. 제안하는 AFE의 과도 응답 특성
Fig. 11. Proposed AFE transient response characteristics

그림 12는 잡음을 인가하여 터치 신호에 대한 출력의 과도 응답을 시뮬레이션한 결과이다. 제안한 회로에서 CA 출력단(Without BPF)은 잡음과 신호가 함께 검출되었지만 BPF를 사용하면 잡음이 감쇄되고 증폭된 출력 파형을 확인할 수 있다. 식 (13)-(15)를 통해 mutual capacitive touch sensor의 AFE에 대한 SNR을 측정할 수 있다.

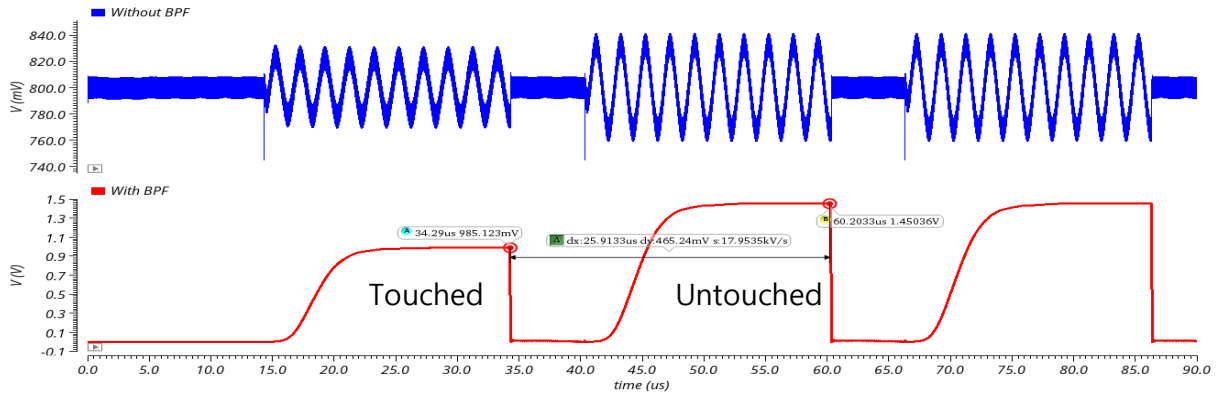


그림 12. 잡음 인가 시 출력 파형 측정 비교

Fig. 12. Comparison of output waveform measurements when noise is applied

$$SNR [dB] = 20 \log \frac{STouch}{NTouch_{RMS100}} \quad (13)$$

$$STouch \quad (14)$$

$$= Signal_{Touch,AVG100} - Signal_{Untouch,AVG100}$$

$$NTouch_{RMS100} \quad (15)$$

$$= \sqrt{\frac{\sum_{n=0}^{99} (Signal[n] - Signal_{Touch,AVG100})^2}{100}}$$

STouch는 터치 강도, AVG100은 100번 반복 동작한 데이터들의 평균, NTouchRMS100은 100번 반복 동작할 때 데이터들의 RMS 평균이다. 잡음을 인가할 때 CA 출력단의 SNR은 5dB였지만 제안하는 LPF를 이용하여 BPF를 생성한 출력을 측정하면 58dB의 SNR을 얻을 수 있었다. 이는 구동 신호를 기준으로 통과 대역 이외의 외부에서 TSP에 영향받는 잡음과 AFE 내부 잡음을 차단하여 높은 SNR을 가질 수 있다. 500KHz의 Tx 주파수를 설정하여 120Hz의 frame rate로 동작할 수 있다. Frame rate의 식 (16)은 다음과 같다. NSTEP은 측정 횟수(times), NTx와 NRx는 각 채널 수이다.

$$Fame\ rate = \frac{1}{\frac{1}{Tx\ freq} \times N_{step} \times N_{Tx} \times N_{Rx}} \quad (16)$$

표 3은 제안하는 논문과 참고논문 AFE의 특성을 비교한 표이다. 본 논문을 사용할 경우, 저전력으로 설계할 수 있으며 높은 SNR을 구현할 수 있다.

표 3. 기존 논문들의 결과 비교

Table 3. Comparison of results of previous papers

Parameter	This work	Ref. [3]	Ref. [7]	Ref. [8]
Process	0.18 um	0.13 um	0.065 um	0.18 um
Supply voltage	1.8V	-	1.2V	1.8V
# of electrode	Tx: 20 Rx: 16	Tx: 31 Rx: 15	Tx: 44 Rx: 78	Tx: 32 Rx: 18
Tx driving Freq (Hz)	500k	-	1.25M	200k
Frame rate	120Hz	240Hz	485Hz	120Hz
SNR (dB)	58	54.2	40.4	51.5
Power consumption	8.8 mW	11.5 mW	13 mW	23.9 mW

V. 결론

본 논문에서는 TSP의 두께 감소와 채널 수 증가로 발생하는 기생성분으로 감도 손실이 커지는 현상, TSP와 AFE에 검출되는 잡음 성분을 해결하기 위한 AFE를 제안하였다. 기존 방식의 TSP에 사용하는 AFE는 이득을 키워도 기준전압을 중심으로 감지하기 때문에 출력 전압 범위가 VDD/2로 제한된 이득으로 감지하는 제한적인 문제를 확인하였다.

본 논문에서는 이와 같은 문제를 해결하기 위해 FDA를 이용한 4차 능동형 LPF로 출력 전압을 전 범위를 사용할 수 있게 하였고, CA의 출력 신호를 추가로 증폭할 수 있게 하여 감도를 향상시켰다. 또한 LPF 앞단에 HPF를 설계해서 BPF로 설계하였고, 중심주파수 500kHz 부근에서 약 15dB로 터치 신호를 증폭할 수 있다. BPF의 차단 주파수는 각 253KHz, 741KHz이다. 각 차단 주파수의 기울기는 $\pm 80\text{dB/decade}$ 로 구동 신호의 주파수는 통과시키고 저주파 및 고주파 잡음을 차단하여 58dB의 높은 SNR을 얻을 수 있었다. 제안한 회로는 TSMC의 0.18 μm CMOS 공정을 이용하였고, Virtuoso Spetre를 통해 성능 분석을 하였다.

References

- [1] K. P. Gungl, "Computer interface and touch sensitive screens", Proceedings. VLSI and Computer Peripherals. COMPEURO 89, Hamburg, West Germany, pp. 2/98-2/100, May 1989. <https://doi.org/10.1109/CMPEUR.1989.93382>.
- [2] L. Barna, M. Koivuluoma, M. Hasu, J. Tuppurainen, and A. Varri, "The Use of Electromechanical Film (EMFi) Sensors in Building a Robust Touch-Sensitive Tablet-Like Interface", IEEE Sensors Journal, Vol. 7, No. 1, pp. 74-80, Jan. 2007. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2006.888608>.
- [3] S. H. Ko and B. D. Yang, "An Interference-Resilient 31×15 Touch-Screen Panel Read-Out IC Based on Chirp Spread Spectrum and Pseudo Random Orthogonal Sequences", 2019 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), pp. 1-5, May 2019. <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2019.8702666>.
- [4] G. Barrett and R. Omote, "Projected-Capacitive Touch Technology", Information Display, Vol. 26, No. 3, pp. 16-21, Mar. 2010. <https://doi.org/10.1002/j.2637-496X.2010.tb00229.x>.
- [5] K.-D. Kim, et al., "A capacitive touch controller robust to display noise for ultrathin touch screen displays", 2012 IEEE International Solid-State Circuits Conference, San Francisco, CA, USA, pp. 116-117, Feb. 2012. <https://doi.org/10.1109/ISSCC.2012.6176943>.
- [6] J. Lin, M. Lin, and Chenghung Lin, "Mutual Capacitive Calculation for Touch Panel Design", 6th International Conference on Management, Education, Information and Control (MEICI 2016), pp. 339-343, Sep. 2016. <https://doi.org/10.2991/meici-16.2016.70>.
- [7] A. N. Ragheb, M. G. A. Mohamed, and H. Kim, "Differentiator based sensing circuit for efficient noise suppression of projected mutual-capacitance touch screens", 2016 International Conference on Electronics, Information, and Communications (ICEIC), Danang, Vietnam, pp. 1-5, Jan. 2016. <https://doi.org/10.1109/ELINFOCOM.2016.7562994>.
- [8] J. Park, Y.-H. Hwang, J. Oh, J.-E. Park, and D.-K. Jeong, "Adiabatically driven touch controller analog front-end for ultra-thin displays", 2018 IEEE Custom Integrated Circuits Conference (CICC), San Diego, CA, USA, pp. 1-4, Apr. 2018. <https://doi.org/10.1109/CICC.2018.8357036>.
- [9] J.-E. Park, D.-H. Lim, and D.-K. Jeong, "A Reconfigurable 40-to-67 dB SNR, 50-to-6400 Hz Frame-Rate, Column-Parallel Readout IC for Capacitive Touch-Screen Panels", IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 49, No. 10, pp. 2305-2318, Oct. 2014. <https://doi.org/10.1109/JSSC.2014.2336800>.
- [10] B. Razavi, "Design of Analog CMOS Intergrated Circuits", MC Graw Hill, 2013.

저자소개

김 상 현 (Sang-Heon Kim)



2021년 2월 : 청주대학교
반도체공학과(공학사)
2021년 3월 ~ 2023년 8월 :
청주대학교 반도체공학과
(공학석사)
관심분야 : CMOS Analog IC 설계,
터치센서 AFE 설계

손 상 희 (Sang-Hee Son)



1983년 2월 : 한양대학교
전자공학과(공학사)
1985년 2월 : 한양대학교
전자공학과(공학석사)
1988년 2월 : 한양대학교
전자공학과(공학박사)
1998년 9월 ~ 1991년 2월 :

순천향대학교 전산학과 전임강사

1991년 3월 ~ 현재 : 청주대학교 반도체공학과 교수

2009년 ~ 2010년 : Univ. of Texax at Dallas 방문교수

관심분야 : CMOS Analog IC 설계 및 센서 신호 처리
회로 설계