

스위치드 커패시터를 이용한 동작 주파수에 무관한 정전용량 터치스위치

(Capacitive Touch Switch Regardless of Operating Frequency Using a Switched-Capacitor)

이무진* · 성광수**

(Mu-Jin Lee · Kwang-Su Seong)

Abstract

This paper proposes a capacitive touch switch using a switched-capacitor. The proposed method charges capacitance for measurement using the switched-capacitor until the voltage across the capacitance reaches a threshold voltage. As the proposed method uses the number of times being charged to measure the capacitance, the method has no relation with the operating frequency of the switched-capacitor. This paper also shows the quantization resolution of the proposed method is related to the capacitance in the switched-capacitor and the threshold voltage, i.e., the resolution is improved when the capacitance in the switched-capacitor is decreased and the threshold voltage is increased. Simulation result shows the method gives 31fF quantization resolution when the capacitance in the switched-capacitor is 50fF and threshold voltage is 80% of the supply voltage.

Key Words : Capacitive Touch Switch, Switched-Capacitor, The Number of Times Being Charged

1. 서 론

정전용량 터치스witch는 부드러운 터치감촉을 가지며 제품을 얇게 설계할 수 있어서 MP3플레이어, TV, 컴퓨터, 램프, 월 스위치(wall switch) 등 다양한 전자 기기에 사용되고 있다[1].

정전용량 터치스witch는 손가락과 터치 전극판(touch electrode plate) 사이에 생성된 정전용량을 측정 한 후 이를 이용해 스위치의 온/오프를 결정한다. 정전용량 터치스switch는 정전용량 센서의 한 응용분야이다. 정전용량 센서는 측정하고자 하는 정전용량을 전압, 주파수, 혹은 시간으로 변환 한 후 변환된 값을

* 주저자 : 영남대학교 전자공학과 박사과정
** 교신저자 : 영남대학교 전자공학과 부교수
* Main author : The Doctor's course, Department of Electronic Engineering, Yengnam University
** Corresponding author : Associate Professor, Department of Electronic Engineering, Yengnam University
Tel : 053-810-2481, Fax : 053-810-4770
E-mail : kssung@ynu.ac.kr
접수일자 : 2013년 4월 6일
1차심사 : 2013년 4월 11일
심사완료 : 2013년 5월 14일

측정한다[1-7]. 간단하지만 효과적인 정전용량 측정 방법은 측정하고자 하는 정전용량을 충전하면서 정전용량 양단의 전압이 임계전압에 이르는 상승시간을 측정하는 방법이다[1-4]. 상승시간이 측정하고자 하는 정전용량에 비례하므로 상승시간을 측정하는 정확도가 터치스위치 성능에 큰 영향을 미친다[1].

상승시간 측정방법 중 일반적인 방법은 디지털 카운터를 이용하는 것으로, 상승시간 구간을 디지털 카운터로 세는 방법으로 기존 다양한 정전용량 터치스위치에서 이용되고 있다[2-4]. 디지털 카운터를 이용할 경우 양자화 오차가 발생하며 이를 줄이기 위해서는 카운터의 동작 주파수를 높여야한다.

정전용량 터치스วิต치를 다양한 응용 분야에 적용하기 위해 이를 MCU(micro-controller unit)에 포함하여 하나의 칩으로 구현된 경우가 많으며, 상승시간을 측정하는 디지털 카운터 역시 MCU에서 사용되는 클럭을 사용한다. 그러나 MCU의 저전력 특성 때문에 MCU의 동작 주파수를 크게 높이는 것은 적절하지 않다[1]. 이 문제를 완화하기 위해 다중 클럭을 이용한 상승시간 측정법이 제안되었다[1]. 이 방법은 주파수가 동일하며 균등한 간격으로 배치된 다중 클럭 신호들을 이용한다. 그러나 여전히 상승시간을 효과적으로 측정하기 위해서는 주파수를 높여야 하는 문제점이 있다.

본 논문에서는 스위치드 커패시터(switched-capacitor)를 이용한 정전용량 측정법을 제안한다. 스위치드 커패시터는 2개의 스위치와 1개의 커패시터로 구성되어 있으며 이를 이용해 흐르는 평균전류를 제어하는 장치로 평균저항이 커패시터 용량과 스위치 동작 주파수에 반비례한다[8]. 제안된 방법에서 스위치드 커패시터를 이용해 측정하고자 하는 정전용량을 충전한다. 먼저 스위치드 커패시터에 있는 커패시터를 공급전압으로 충전한 후 이를 이용해 측정하고자 하는 정전용량을 충전한다. 측정하고자 하는 정전용량 양단의 전압이 임계전압에 이를 때까지 이를 반복적으로 수행한다. 충전 횟수가 측정하고자 하는 정전용량에 비례하므로 충전 횟수를 세면 정전용량을 구할 수 있다.

본 논문에서 제안한 방식 역시 양자화 오차를 발생

한다. 디지털 카운터를 이용한 상승시간 측정 방식에서 양자화 오차는 상승시간을 측정하는 디지털 카운터의 동작 주파수에 의해 결정되지만, 제안된 방법에서 양자화 오차는 스위치의 동작 주파수와 무관하며 스위치드 커패시터 안에 있는 정전용량과 임계전압에 의해 결정된다. 이는 제안된 정전용량 터치스วิต치를 MCU와 함께 만들 경우 MCU의 동작 주파수를 높이지 않아도 양자화 오차를 최소화할 수 있음을 의미한다.

2. 제안된 방법

제안된 정전용량센서는 그림 1과 같다. C_S 는 손가락과 전극판 사이에 생성된 정전용량이고, C_P 는 기생정전용량이다. 여기서 $C_1 = C_P + C_S$ 로 정의한다. 스위치 SW1은 외부의 정전용량 C_1 을 초기화하는데 사용되고, 스위치 SW2, SW3 그리고 정전용량 C_0 으로 구성된 스위치드 커패시터는 정전용량 C_1 을 충전하는데 사용된다. 여기서 스위치 SW2와 SW3는 동시에 켜지지 않는다. 비교기는 노드 A의 전압이 임계전압 V_{TH} 보다 큰가를 판단하는데 사용된다. 만일 $v_A < V_{TH}$ 이면 출력 값 $V_{OUT} = V_{DD}$ 이 되고, 그렇지 않으면 $V_{OUT} = 0$ 이 된다. V_{OUT} 은 디지털 값을 가지므로 $V_{OUT} = V_{DD}$ 일 경우를 '1'로, $V_{OUT} = 0$ 일 경우 '0'으로 표시한다.

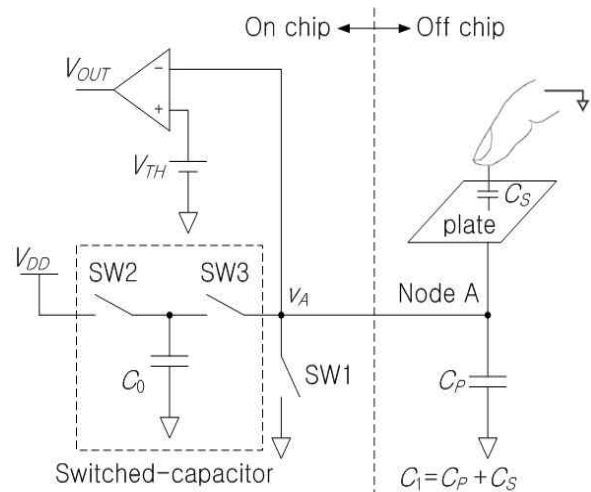


그림 1. 제안된 정전용량센서
Fig. 1. Proposed capacitive sensor

제안된 회로의 동작 순서는 그림 2와 같이 프로그래밍 언어의 함수형태로 표현하였다. 이 함수를 부를 때마다 외부 정전용량 C_1 을 측정할 후 그 값을 넘겨준다. 함수 내에서 카운터 값 N 은 외부 정전용량 C_1 을 몇 번 충전했는지를 나타낸다. 단계 1에서는 카운터 값 N 을 초기화하고, 스위치 SW1로 칩 외부에 있는 정전용량 C_1 을 초기화 한다. 단계 2에서는 C_0 을 이용해 C_1 을 충전하는 단계로 V_{OUT} 이 '1'일 때 수행되며, 이는 아직 $v_A < V_{TH}$ 임을 나타낸다. 이렇게 단계 2를 반복 수행하여 V_{OUT} 이 '0'이 되면 단계 2에서 나오게 되며 N 에는 외부 정전용량 C_1 을 충전한 횟수가 저장된다. 3단계에서는 측정된 값에서 0.5를 빼서 양자화 오차가 ± 0.5 회가 되게 한다.

그림 1에서 C_1 을 초기화한 후 스위치드 커패시터를 $n-1$ 번 동작시켜 C_1 을 충전하였을 때 노드 A의 전압을 $v_A(n-1)$ 로 표시한다. 이 상태에서 스위치 SW2를 이용해 C_0 을 V_{DD} 로 충전한 후 스위치 SW3을 이용해 C_0 을 노드 A에 연결한다. 이때 V_{DD} 로 충전된 C_0 과 $v_A(n-1)$ 로 충전된 C_1 을 연결하더라도 전체 전하량은 보존되어야 하고 합성 정전용량은 $C_0 + C_1$ 이 되므로 수식 (1)과 같이 표현된다.

$$C_0 V_{DD} + C_1 v_A(n-1) = (C_0 + C_1) v_A(n) \quad (1)$$

수식 (1)을 정리하여 수식 (2)와 같이 표현할 수 있다. 수식 (2)는 C_1 을 n 번 충전했을 때 노드 A의 전압을 나타낸다.

Proposed CapSensor()	
step 1	$N=0$; SW1을 이용해 C_1 초기화;
step 2	while ($V_{OUT}='1'$) SW2를 이용해 C_0 을 V_{DD} 로 충전; SW3을 이용해 C_0 으로 C_1 충전; $N=N+1$; end while
step 3	return $N-0.5$;

그림 2. 제안된 방법의 동작 순서
Fig. 2. Procedure for operating the proposed method

$$v_A(n) = \frac{C_0}{C_0 + C_1} V_{DD} + \frac{C_1}{C_0 + C_1} v_A(n-1) \quad (2)$$

노드 A의 초기전압 $v_A(0)=0$ 이므로 이를 수식 (2)에 적용하여 $v_A(n)$ 를 구하면 등비급수 형태인 $v_A(n) = \frac{C_0 V_{DD}}{C_0 + C_1} \sum_{i=0}^{n-1} \left(\frac{C_1}{C_0 + C_1} \right)^i$ 로 표현된다. 이 등비급수를 풀면 수식 (3)과 같아진다.

$$v_A(n) = \left(1 - \left(\frac{C_1}{C_0 + C_1} \right)^n \right) V_{DD} \quad (3)$$

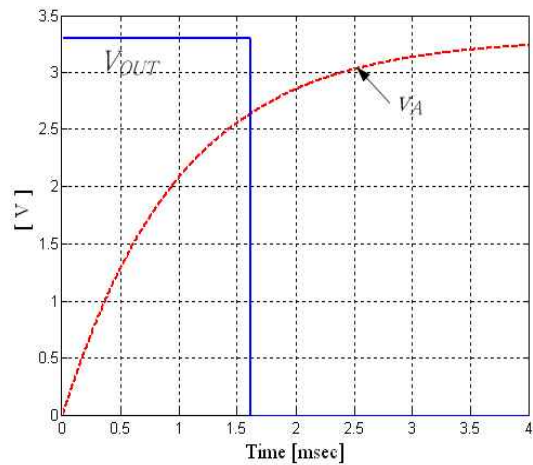


그림 3. v_A 와 V_{OUT} 의 파형
Fig. 3. Waves of v_A and V_{OUT}

$C_1/C_0 = 1,000$, $V_{DD}=3.3V$, 그리고 $V_{TH}=k V_{DD}$ 에서 k 가 0.8일 경우 노드 A의 전압 v_A 와 비교기 출력 V_{OUT} 의 파형은 그림 3과 같다. 여기서 스위치드 커패시터의 동작 주파수를 1MHz로 두었다. 노드 A의 전압이 마치 저항을 통해 C_1 을 충전하는 것과 유사함을 알 수 있다. 또한 비교기 출력 V_{OUT} 은 노드 A의 전압이 V_{TH} 에 도달하기 전까지는 '1'을 유지하다가 V_{TH} 에 도달하면 '0'이 됨을 알 수 있다.

노드 A의 전압이 V_{TH} 에 도달할 때까지 소요되는 n 을 n_{TH} 이라 하면 $v_A(n_{TH}) = V_{TH}$ 가 되며 수식 (3)으로부터 수식 (4)와 같이 표현된다. 이때 $V_{TH}=k V_{DD}$ 이고 $0 < k \leq 1$ 이다.

$$\left(1 - \left(\frac{C_1}{C_0 + C_1}\right)^{n_{TH}}\right) V_{DD} = k V_{DD} \quad (4)$$

수식 (4)에서 n_{TH} 를 구하면 수식 (5)와 같아진다.

$$n_{TH} = \frac{\ln(1-k)}{\ln(C_1) - \ln(C_0 + C_1)} \quad (5)$$

여기서 $C_0 \ll C_1$ 이면 급수를 이용해 $\ln(C_0 + C_1) \approx \ln(C_1) + C_0 \frac{1}{C_1}$ 로 근사화할 수 있으므로 수식 (5)는 수식 (6)과 같이 근사화할 수 있다. 수식 (6)에서 n_{TH} 가 측정하고자 하는 정전용량 C_S 에 비례함을 알 수 있다.

$$n_{TH} \approx -\frac{C_1}{C_0} \ln(1-k) = -\frac{C_P + C_S}{C_0} \ln(1-k) \quad (6)$$

제안된 회로에서 잡음을 고려하지 않을 경우 양자화 오차에 의해 측정 가능한 최소 정전용량이 결정되며 이를 양자화 해상도(quantization resolution)라고 한다. 측정하고자 하는 정전용량 C_S 의 범위를 $0 \sim C_{SI}$ 라 가정한다. C_S 의 값이 0일 경우 n_{TH} 값을 n_{TH0} 라 하고, C_S 의 값이 C_{SI} 일 경우 n_{TH} 값을 n_{THI} 라 하면 이 두 값의 차이는 수식 (7)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} n_{THI} - n_{TH0} &\approx \left(-\frac{C_P + C_{SI}}{C_0} + \frac{C_P}{C_0}\right) \ln(1-k) \\ &= -\frac{C_{SI}}{C_0} \ln(1-k) \end{aligned} \quad (7)$$

수식 (7)이 의미하는 바는 $0 \sim C_{SI}$ 범위의 정전용량을 ($n_{THI} - n_{TH0}$)레벨로 분해할 수 있음을 의미한다. 이를 이용해 수식 (8)과 같이 양자화 해상도를 구할 수 있다. 양자화 해상도는 카운터 값 1로 측정 가능한 정전용량 값 혹은 스위치드 커패시터 1회 동작으로 측정 가능한 정전용량 값을 의미한다.

$$QR = \frac{C_{SI} - 0}{n_{THI} - n_{TH0}} \approx -\frac{C_0}{\ln(1-k)} \quad (8)$$

수식 (8)이 의미하는 바와 같이 제안된 회로에서 양자화 해상도는 스위치드 커패시터 내부의 C_0 과 임계 전압 상수 k 에 의해 결정됨을 알 수 있다. 예를 들어 $C_0=50\text{fF}$ 이고, $k=0.8$ 이면 $QR=31.1\text{fF}$ 의 정전용량을 분해할 수 있음을 나타낸다.

그림 2의 제안된 알고리즘에서 카운터 값 N 은 정수 값만 가진다. 노드 A의 전압이 V_{TH} 보다 작으면 외부 정전용량을 충전하고 카운터 값을 증가시키므로 N 은 수식 (9)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} N = \lceil n_{TH} \rceil &\approx \left\lceil -\frac{C_1}{C_0} \ln(1-k) \right\rceil \\ &= \left\lceil -\frac{C_P + C_S}{C_0} \ln(1-k) \right\rceil \end{aligned} \quad (9)$$

$k=0.8$ 일 경우 $N \approx \left\lceil \frac{1.61}{C_0} (C_P + C_S) \right\rceil$ 가 되어 카운터 값 N 이 측정하고자 하는 정전용량 C_S 에 비례함을 알 수 있다. 여기서 $n_{TH} \leq N$ 이고 $N - n_{TH} < 1$ 이므로 $n_{TH} \leq N < n_{TH} + 1$ 이 된다. 부등식 모든 항에서 0.5를 빼면 $n_{TH} - 0.5 \leq N - 0.5 < n_{TH} + 0.5$ 가 된다. 양자화 오차를 ± 0.5 로 만들기 위해 그림 2에서 측정한 카운터 값 N 에서 0.5를 뺀 $N - 0.5$ 를 최종 결과로 사용한다.

3. 시뮬레이션 결과

제안된 정전용량센서를 구현하기 위해서는 수십 fF의 정전용량을 제작할 수 있어야 하며, 이를 구현하려면 반도체 칩을 제작해야 한다. 본 논문에서는 시뮬레이션을 통해 제안된 방법의 성능을 평가하였다. 본 시뮬레이션에서 특별한 언급이 없으면 $V_{DD}=3.3\text{V}$, $C_0=50\text{fF}$, $C_P=50\text{pF}$, $0 \leq C_S \leq 1 \text{ pF}$, $k=0.8$ 을 이용하였다.

수식 (5)에서 n_{TH} 는 측정하고자 하는 정전용량 C_S 에 대해 비선형이다. 수식 (6)에서 수식 (5)를 직선으로 근사화하여 n_{TH} 를 측정함으로써 그에 비례하게 C_S 를 구할 수 있다고 하였다. 먼저 시뮬레이션을 통해 수식 (5)를 직선으로 표현 가능한지에 대해 알아본다. 그림 4는 $0 \leq C_S \leq 1\text{pF}$ 구간에서 수식 (5)를

이용해 n_{TH} 을 그린 것으로 거의 직선처럼 보인다. 그림 4에 있는 그래프를 1차식으로 근사화하면 $n_{TH} = 32.19 \times 10^{12} \times C_S + 1610.2$ 이 된다. 해당구간에서 1차 근사식의 최대 오차율은 $5.45 \times 10^{-10}\%$ 로, 이는 해당 구간에서 n_{TH} 와 C_S 의 관계를 선형으로 봐도 무방함을 의미한다.

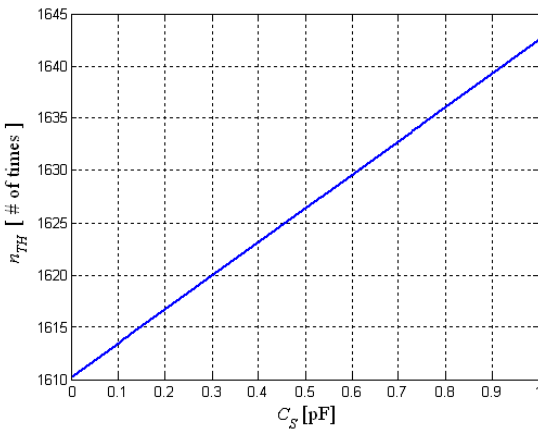


그림 4. C_S 변화에 따른 n_{TH}
Fig. 4. n_{TH} versus C_S

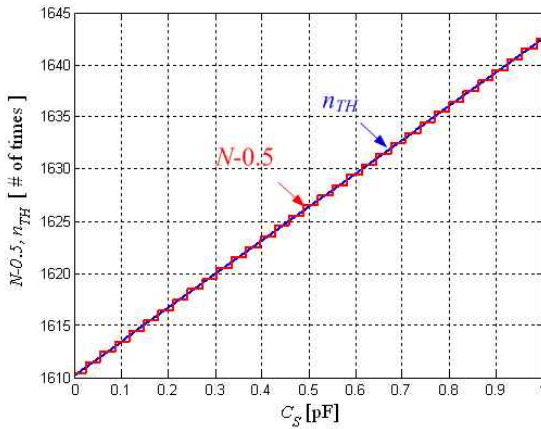


그림 5. C_S 변화에 따른 $N-0.5$ 와 n_{TH} 그래프
Fig. 5. $N-0.5$ and n_{TH} versus C_S

그림 5는 $0 \leq C_S \leq 1$ pF일 때 수식 (5)를 이용해 구한 n_{TH} 와 그림 2의 제안된 알고리즘 결과인 $N-0.5$ 를 그래프에 그린 것이다. $N-0.5$ 는 계단형식으로 증가하면서 n_{TH} 을 따라간다. C_S 값이 0일 때 n_{TH} 는 1610.2

이고 C_S 값이 1pF일 때 n_{TH} 는 1642.4이므로 C_S 의 범위 내에 32.2개의 레벨이 있음을 알 수 있다. 따라서 1pF의 정전용량을 32.2개의 단계로 분해할 수 있으므로 양자화 해상도는 $QR = 1\text{pF}/32.2 = 0.031\text{pF}$ 임을 알 수 있다. 즉 1개의 단계마다 31fF을 분해할 수 있음을 나타낸다.

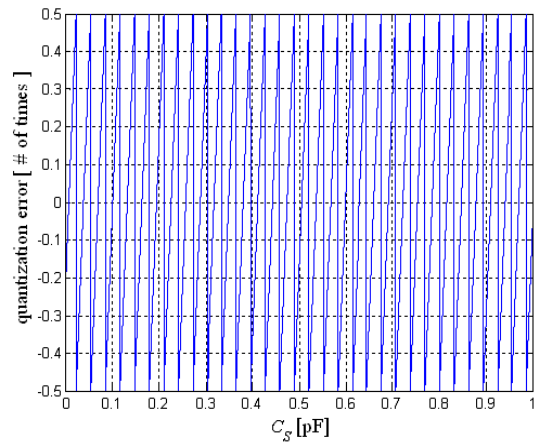


그림 6. $(N-0.5)$ 의 양자화 오차
Fig. 6. Quantization error of $(N-0.5)$

$(N-0.5)$ 의 양자화 오차는 $n_{TH} - (N-0.5)$ 이며, 이를 그래프로 그리면 그림 6과 같다. $(N-0.5)$ 는 n_{TH} 와 비교하여 오차범위가 ± 0.5 회가 된다. 그림 5 설명에서 정전용량센서의 양자화 해상도가 31.1 fF이므로, 제안된 방법에서 측정된 정전용량의 양자화 오차는 $\pm \frac{31.1 \text{ fF}}{2} = \pm 15.6 \text{ fF}$ 사이의 값이 된다. 즉 양자화 오차만을 고려할 경우 제안된 알고리즘에서 측정된 $(N-0.5)$ 는 $\pm 15.6 \text{ fF}$ 내의 오차를 의미한다.

수식 (8)에서 양자화 해상도를 정의하였으며 이를 근사화 하여 양자화 해상도가 C_0 와 임계전압 상수 k 에 의해 결정됨을 보였다. 그림 7은 기생정전용량이 $10 \text{ pF} \leq C_p \leq 100 \text{ pF}$ 일 경우 근사화하지 않은 양자화 해상도와 근사화 한 양자화 해상도를 그래프로 그린 것이다. 두 그래프가 거의 일치하여 하나의 그래프처럼 보인다. 이 두 그래프 사이의 최대 오차가 $5.86 \times 10^{-5} \text{ fF}$ 으로 양자화 해상도가 기생정전용량에 거의 무관함을 보여준다.

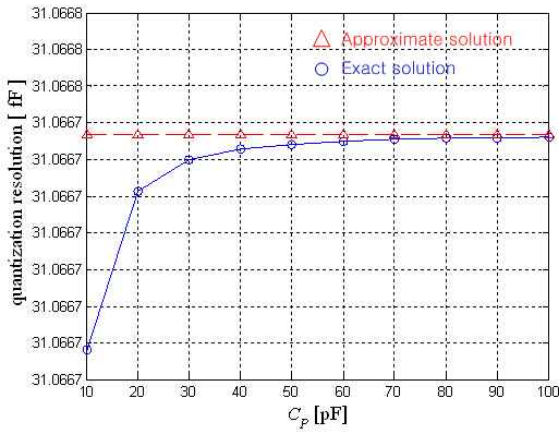


그림 7. 기생정전용량 C_p 변화에 따른 양자화 해상도 변화
 Fig. 7. Quantization resolution versus parasitic capacitance C_p

그림 8과 9에서는 양자화 해상도가 C_0 와 k 에 의해 결정됨을 보이고자 한다. 그림 8은 $50 \text{ fF} \leq C_0 \leq 500 \text{ fF}$ 범위에서 근사화하지 않은 양자화 해상도와 근사화한 양자화 해상도를 그래프로 그린 것이다. 두 그래프가 거의 일치하여 하나의 그래프처럼 보인다. 그림 8에서 최대 오차는 $2.5 \times 10^{-3} \text{ fF}$ 으로 오차를 무시할 수 있을 정도이다.

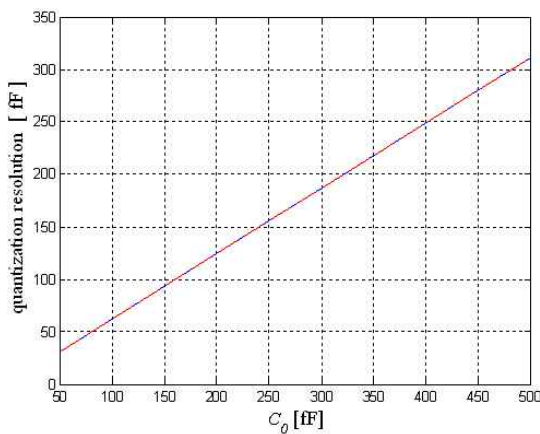


그림 8. C_0 변화에 따른 양자화 해상도 변화
 Fig. 8. Quantization resolution versus C_0

그림 9는 $V_{TH} = kV_{DD}$ 에서 $0.01 \leq k \leq 0.9$ 범위에서 근사화하지 않은 양자화 해상도와 근사화한 양자화

해상도를 그래프로 그린 것이다. 두 그래프가 거의 일치하여 하나의 그래프처럼 보인다. 그림 9에서 최대 오차는 $1.73 \times 10^{-5} \text{ fF}$ 으로 오차를 무시할 수 있을 정도이다.

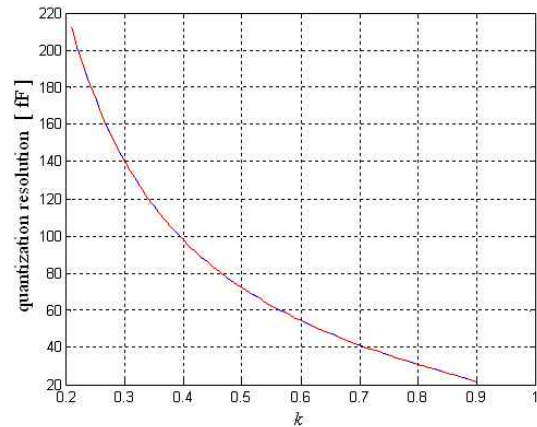


그림 9. k 변화에 따른 양자화 해상도 변화
 Fig. 9. Quantization resolution versus k

그림 8과 9의 시뮬레이션에서 근사화하지 않은 양자화 해상도와 근사화한 양자화 해상도 사이의 오차가 각각 $5.86 \times 10^{-5} \text{ fF}$ 와 $1.73 \times 10^{-5} \text{ fF}$ 로 아주 작은 범위에 있으므로 수식 (8)의 근사식이 상당히 정확함을 알 수 있다. 그리고 수식 (8)의 근사식으로부터 제안된 방식의 양자화 해상도가 C_0 와 k 에 의해 결정됨을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 스위치드 커패시터를 이용한 정전용량 터치스위치를 제안하였다. 측정하고자 하는 정전용량 양단의 전압이 임계전압에 도달할 때까지 스위치드 커패시터를 이용해 측정하고자 하는 정전용량을 반복해서 충전한다. 충전 횟수가 측정하고자 하는 정전용량에 비례하므로 충전 횟수를 세면 해당 정전용량을 측정할 수 있다. 제안된 방법에서 정전용량 측정 시 양자화 해상도는 해당 스위치의 동작 주파수와 무관하고 스위치드 커패시터 내의 정전용량 값과 비교기의 임계전압에 의해 결정되며, 스위치드 커패시터

내의 정전용량 값이 작을수록 그리고 임계전압 값이 클수록 양자화 해상도가 향상된다. 시뮬레이션에서 스위치드 커패시터내부에 있는 커패시터의 정전용량 값이 50 fF 이고 임계전압이 공급전압의 80%일 때 31 fF의 양자화 해상도를 가짐을 보였다.

감사의 글

본 논문은 2011학년도 영남대학교 학술연구조성비 지원에 의한 것임.

References

[1] Kwang-Su Seong, "An efficient pulse width measurement method using multiphase clock signals for capacitive touch switches," Journal of Electrical Engineering & Technology, (accepted for publication).
 [2] Kwang-Su Seong, "A design of full digital capacitive sensing touch key reducing the effects due to the variations of resistance and clock frequency," Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol.23, No.4, pp.39~46, Apr.2009.
 [3] Chul Nam, Young-Gun Pu, and Kang-Yoon Lee, "12x12 capacitive matrix touch sensing unit for SoC application in 0.18um CMOS process," 2009 International SoC design conference (ISOCC), pp.305-308, Nov.2009.
 [4] Microchip Technology Inc., "40/44-pin, flash microcontrollers with nanoWattXLP and mTouch technology, PIC16(L)F707," 2011.

[5] Nils Karlsson, "A study of a high-resolution linear circuit for capacitive sensors," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, vol.48, no.6, pp.1122-1124, Dec.1999.
 [6] Seunghoon Ko, Hyungcheol Shin, Jaemion Lee, Hongjae Jang, Byeong Cheol So, Ilhyun Yun, and Kwyro Lee, "Low noise capacitive sensor for multiple-touch mobile handset's applications," 2010 IEEE Asian Solid-State circuits conference, pp.1-4, Nov.2010.
 [7] Manel Gasulla, "The noise performance of a high-speed capacitive-sensor interface based on a relaxation oscillator and a fast counter," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, vol.54, no.5, pp.1934-1940, Oct.2005.
 [8] Wikipedia - The free encyclopedia, "Switched capacitor," available on <http://www.wikipedia.org>.

◇ 저자소개 ◇



이무진 (李茂珍)

1982년 12월 26일생. 2006년 영남대학교 컴퓨터공학과 졸업. 2008년 영남대학교 전자공학과 대학원 졸업(석사). 현재 영남대학교 전자공학과 박사과정.



성광수 (成桃洙)

1966년 10월 2일생. 1990년 한양대학교 전자공학과 졸업. 1992년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1997년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(박사). 현재 영남대학교 전자공학과 부교수.