

논문 2016-53-10-4

샘플 홀드 회로를 이용한 초퍼 안정화 기법이 적용된 저잡음 증폭기

(LNA with Chopper Stabilization Technique Using Sample and Hold Circuit)

박 영 민*, 남 민 호*, 조 경 록**

(Youngmin Park, Minho Nam, and Kyoungrok Cho[©])

요 약

본 논문은 초퍼 안정화기법을 적용한 저잡음 증폭기를 제안한다. 초퍼 안정화기법은 CMOS 증폭기의 저주파수 대역 오프셋과 플리커 잡음을 감소시키는 효과적인 기법이다. 기존의 초퍼 증폭기는 초퍼로 인해 발생하는 초핑 스파이크를 제거하기 위해 Low Pass Filter(LPF)를 사용하기 때문에 저항과 커패시터가 큰 면적을 차지한다는 단점을 가지고 있다. 제안된 초퍼 증폭기는 LPF 대신 샘플 앤 홀드 방식의 초핑 스파이크 제거 회로를 사용하여 적은 전압감쇄에서 36%, 면적에서 11%의 이득을 얻을 수 있다.

Abstract

This paper proposes a Low Noise Amplifier (LNA) with chopper stabilization technique with a sample-and-hold circuit. Chopper stabilization technique is effective in terms of reducing low frequency offset and flicker noise. Conventional chopper amplifier has a disadvantage in area because of using Low Pass Filter (LPF) for remove chopping spike. The proposed chopper amplifier employed sample and hold technique to decrease chopping spike instead of LPF that improves 36% in voltage damping and 11% in area.

Keywords : chopper amplifier, chopper stabilization, 1/f noise, low pass filter, sample and hold

I. 서 론

최근 기술이 발달함으로써 사람들의 편의와 건강에 대한 관심 또한 커져가고 있다. 이러한 추세에 발맞춰 시장에는 IoT(Internet of Things) 제품과 웨어러블 제품들이 쏟아져 나오고 있다.^[1] IoT제품과 웨어러블 제품에는 주변 환경에 대한 상태를 체크하고 정보를 얻어 신호로 바꾸어 주는 센서가 사용된다. 센서는 외부의

압력, 힘, 변위 등이 발생했을 때, 변화량들로 인해 저항 값이 변하게 되는 형태들이 주로 사용된다. 이런 저항형 센서는 저항성분의 변화를 통해 얼마만큼의 힘이 적용되었는지를 측정하는 구조로 만들어진다. 센서에서 측정되어 출력되는 신호들은 여러 어플리케이션으로 전송되어 신호에 대한 피드백으로 사용자 및 주변 환경에 영향을 미치게 된다. 하지만 센서를 통해서 얻을 수 있는 신호의 크기는 매우 작다. 센서의 센싱 엘리먼트의 배치를 통해 선형적인 출력과 SNR(signal to noise ratio)을 향상시킬 수 있지만, 센서에서 SNR과 신호 크기 향상에 한계가 있다. 이런 신호들을 사용해 신호 처리를 하기 위해서는 반드시 증폭기를 필요로 하게 된다.

계측 증폭기(instrumentation Amplifier)는 센서신호를 훼손시키지 않고 계측하기 위해서 많이 사용되고 있

* 학생회원, ** 정회원, 충북대학교대학교 전자정보대학 (College of Electrical and Computer Engineering, Chungbuk National University)

[©] Corresponding Author (E-mail : krcho@cbnu.ac.kr)

※ 본 논문은 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

Received ; February 4, 2016 Revised ; September 4, 2016

Accepted ; September 28, 2016

는 회로이다. 계측 증폭기의 가장 큰 특징은 입력이 증폭기의 gate로 연결되어 있기 때문에 증폭기의 입력으로 전류가 흘러 들어가지 않고, 센서의 출력임피던스가 크더라도 그 신호들을 훼손시키지 않고 잘 받아들일 수 있다는 점이다. 증폭기의 사용 개수가 늘어나긴 하지만 높은 입력임피던스를 얻고 충분한 gain을 얻을 수 있다는 장점이 있다.

센서신호를 증폭하는 과정에서 신호의 훼손을 막기 위한 방법으로 회로에서 발생하는 잡음을 최소화 하는 것 또한 중요하다. 많은 센서신호들이 저주파수 대역에서 동작하고 이는 저주파수 잡음에 취약하다는 단점이 있다. 저주파수 잡음의 특징은 잡음 성분이 크고, 크기가 주파수에 반비례 한다는 모습을 보인다는 점이다. 이에 일정 주파수 이상에서는 플리커 잡음을 피할 수 있다.

본 논문에서는 초퍼를 이용하여 센서신호를 저주파수 성분이 적은 고주파대역으로 변조시킨 다음 증폭하고, 다시 복조하는 과정을 거쳐 센서신호에 저주파수 잡음의 영향을 최소화 하는 초퍼 안정화 기법을 적용한 LNA(Low Noise Amplifier)를 설계한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 resistive frontend 관련하여 저항형 센서와 계측 증폭기에 대해 알아보고 III장에서는 초퍼안정화 기법에 대해 설명한다. IV장에서는 제안하는 회로의 구조를 제시하고, V장에서는 회로의 성능을 검증한다. 마지막으로 VI장에서는 결론을 맺는다.

II. Resistive front-end

1. 저항형 센서 모델링

저항형 센서는 외부에서의 압력, 힘 등이 작용하여 변위가 발생했을 때, 변화량에 따라 저항크기가 변하는 형태들을 사용한다. 저항형 센서는 가속도 센서, 압력 센서, 터치센서 등에서 많이 사용되어진다.

저항형 센서의 가장 일반적인 방식은 그림 1과 같이 voltage driving 방식의 브릿지 형태의 구성이다. 각 저항들이 센싱 엘리먼트가 되어 외부의 변화에 따라 저항크기가 변하게 되고, 저항크기들의 변화는 V_o 의 전압차로 나타게 된다. 출력이 차동출력 이므로 SNR 측면에서 유리하고 선형적인 출력을 얻을 수 있다.^[2~3]

2. 계측 증폭기(Instrumentation Amplifier)

센서의 출력으로 얻을 수 있는 신호는 크기가 작은 신호이므로 신호처리를 위해서는 반드시 증폭기가 필요하다.

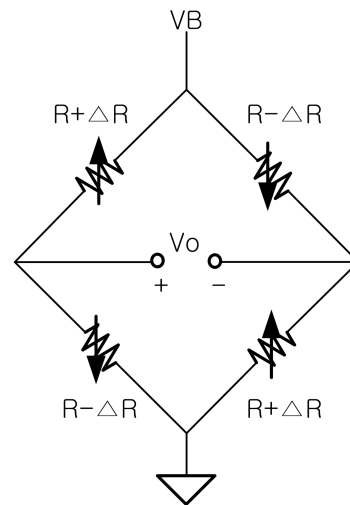


그림 1. 브릿지 형태의 저항 센서 모델
Fig. 1. Sensor model of bridge structure.

일반적인 증폭기 회로가 계측용으로 사용된다면, 심각한 부하효과를 겪을 수 있고 잡음의 영향이 커질 수 있다.

계측 증폭기는 센서신호를 훼손시키지 않고 계측하기 위해서 많이 사용되고 있는 회로이다. 그림 2에 계측 증폭기를 나타내었다. 이 증폭기의 가장 큰 특징은 입력이 증폭기의 gate로 연결되어 있기 때문에 증폭기의 입력으로 전류가 흘러 들어가지 않고, 센서 출력임피던스가 크더라도 그 신호들을 거의 훼손시키지 않고, 잘 받아들일 수 있다. 증폭기의 사용 개수가 늘어나긴 하지만 높은 입력 임피던스를 얻어 부하효과를 방지할 수 있고, 충분한 이득을 얻을 수 있다.

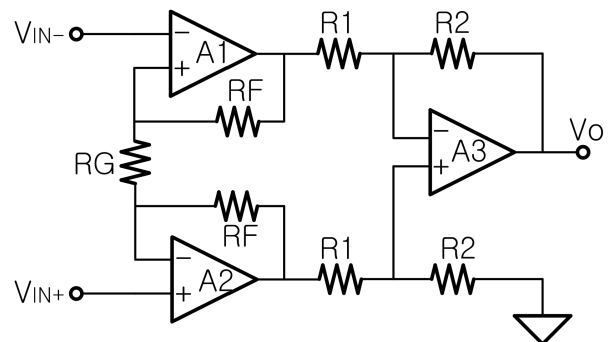


그림 2. 계측 증폭기
Fig. 2. Instrumentation amplifier.

III. 초퍼 안정화 기법

1. 플리커 잡음

회로에서 발생하는 잡음의 종류는 크게 열잡음, 산탄 잡음, 플리커 잡음으로 나눌 수 있다. 열잡음은 가장 일

반적으로 발생하는 잡음으로서 주로 전자의 열적 불규칙 운동에 의해 발생하는 잡음이다. 모든 시스템에 존재하는 잡음으로 전 주파수 대역에서 균등 확률분포 형태를 보여 백색잡음이라고도 불린다.

산탄잡음은 전자의 특수한 현상 때문에 전류에 불규칙한 요동이 생겨 발생하는 잡음으로 전류에 따라 증가하는 특징을 가지고 있고, 열잡음과 마찬가지로 주파수에 무관하게 전 주파수 대역에서 발생하는 잡음이다.

플리커 잡음은 능동소자에서 발생하는 고유의 잡음으로서, 그림 3과 같이 주파수에 반비례하여 발생하기 때문에 1/f 잡음 이라고 불린다. 플리커 잡음의 발생원인은 MOSEFT 게이트 산화막에는 미소 규모의 편흔들이 존재하고, 전자들이 채널을 통해 흐르다 편흔들에 축적되는 경우가 생긴다. 축적된 전자들은 불규칙하게 편흔을 빠져나와 다시 흐르게 된다. 이러한 현상으로 인해 플리커 잡음이 발생하게 된다.

MOSFET에서 잡음 PSD(Power Spectral Density)은 식 (1)로 나타낼 수 있다. 첫 항은 열잡음을 의미하고 두 번째 항은 플리커 잡음을 의미한다.^[9]

$$v_{ni}^2(f) = 4kT \frac{2}{3} \frac{1}{g_m} + \frac{K_f}{WLC_{ox}f} \quad (1)$$

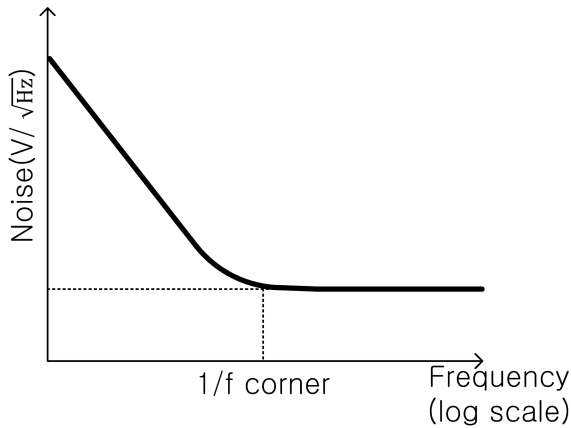


그림 3. 전형적인 잡음 그래프
Fig. 3. Typical noise graph.

2. 초퍼 안정화

가. 초퍼 안정화 증폭기 구조

초퍼 안정화기법을 적용한 증폭기의 동작을 그림 4에 나타내었다. 초퍼 안정화 기법에서는 입력 신호의 변복조에 초퍼를 사용한다. 복조된 신호에는 초퍼를 사용함으로 인한 초핑 스파이크가 포함되어 있다. 따라서 초핑 스파이크를 제거하기 위하여 LPF(Low Pass Filter)를 사용한다.^[7] LPF를 거친 신호는 초핑 스파이크는 제

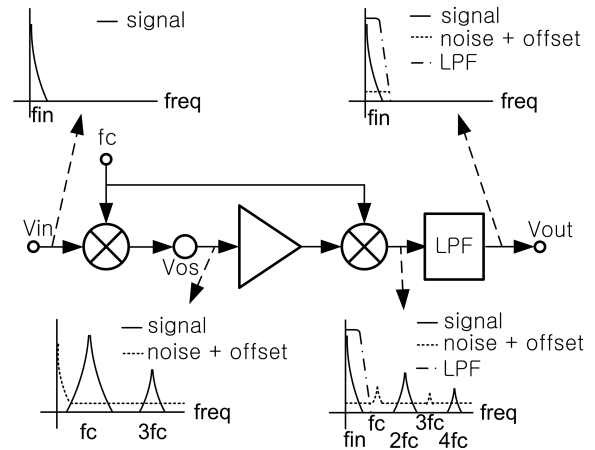


그림 4. 초퍼 안정화 증폭기 원리
Fig. 4. Principle of chopper amplifier

거 되었지만 신호의 감쇄가 생긴다. 또한 LPF를 구성하는 저항과 커패시터의 면적이 회로에서 많은 부분을 차지함으로써 손실되는 면적이 크다는 단점이 있다

나. 초퍼 회로

주로 저주파수대역에서 플리커 잡음이 많이 발생하는 플리커 잡음의 특성을 이용하여, 저주파 입력 신호를 변조를 통해 플리커 잡음이 적은 1/f corner 이상의 고주파수 대역으로 이동시켜 증폭한 후 다시 원 신호로 복조하여 증폭된 신호를 얻을 수 있다. 이 때, 스위칭을 통해 변복조를 수행하는 것을 초퍼 안정화 기법이라 하고, 여기에 사용된 일련의 스위칭 회로를 초퍼라 한다. 초퍼는 그림 5와 같이 스위치 4개로 구성되고 차동신호를 입력받아 번갈아 출력으로 내보내는 초핑 동작을 수행한다.^[6~9]

초퍼 안정화에서는 스위칭 동작에 의해 사각파로 변조와 복조를 하지만 사각파는 사인파들의 합으로 나타낼 수 있기 때문에 사인파를 사용하여 변조와 복조를 설명할 수 있다. 플리커 잡음에 취약한 저주파수대역의 주파수 f_s 를 갖는 신호 $A_{in} \sin(2\pi f_s t)$ 를 입력신호라

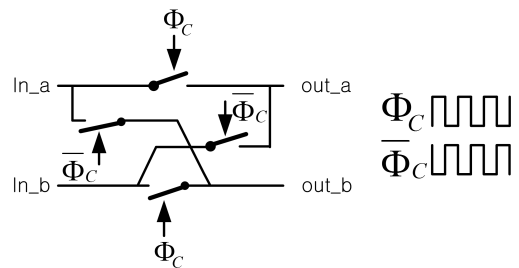


그림 5. 초퍼 회로
Fig. 5. Chopper circuit.

고 가정하면, 입력신호를 증폭했을 때 증폭기에서 발생한 플리커 잡음이 SNR을 떨어뜨린다. 이를 피하기 위해서 초핑 안정화에서는 식 (2)와 같이 플리커 잡음의 영향이 적은 고주파수대역의 주파수 f_c 를 갖는 캐리어 신호 $A_{ch}\sin(2\pi f_c t)$ 를 입력신호에 곱해 변조한다. 변조된 신호는 식 (3)과 같다. 플리커 잡음의 영향이 적은 주파수 f_c 의 신호를 증폭한 후 캐리어신호 $A_{ch}\sin(2\pi f_c t)$ 를 곱해주면 신호는 식 (4)로 복조된다.

$$A_{in}\sin(2\pi f_s t) \times A_{ch}\sin(2\pi f_c t) \tag{2}$$

$$A_{in}A_{ch} \left(\frac{\cos(2\pi(f_s - f_c)t)}{2} - \frac{\cos(2\pi(f_s + f_c)t)}{2} \right) \tag{3}$$

$$\frac{A_{gain}A_sA_{ch}A_{ch}}{2} \left(\frac{\sin(2\pi f_s t) - \frac{\sin(2\pi(f_s - 2f_c)t)}{2}}{\sin(2\pi(f_s + 2f_c)t)} \right) \tag{4}$$

IV. Sample and hold 초핑 스파이크 제거 회로를 이용한 초퍼 증폭기

1. 제안하는 초퍼 증폭기

기존 초퍼 증폭기는 초핑 스파이크 제거를 위해 LPF를 사용하기 때문에 저항과 커패시터로 사용되는 면적이 크고 LPF에서의 신호가 감쇄되는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 sample and hold 방식의 초핑 스파이크 제거 회로를 LPF 대신 사용하는 초퍼 증폭기를 제안한다. 그림 6은 제안하는 초퍼 증폭기의 구조를 보여준다. 제안하는 초퍼 증폭기는 계측 증폭기의 입력단의 앞과 출력단의 뒤에 초퍼를 두어 초핑 안정화 기법을 적용 하였다.

그림 7은 제안하는 초퍼 증폭기의 동작을 나타낸다. 그림 7의 (a)의 신호가 초퍼 증폭기로 입력되면, 초퍼를 통과하며 (b)와 같이 주파수 f_c 의 신호로 변조된다. 변조된 신호는 계측 증폭기를 거치며 (c)와 같이 증폭된 후, 초퍼를 거치며 (d)의 신호로 복조된다. 복조용 초퍼를 거친 신호는 초퍼를 거치면서 (d)와 같은 초핑 스파이크가 포함되어 있는 신호가 된다. 초핑 스파이크는 sample and hold 방식으로 제거하여 (e)와 같은 출력을 얻게 된다.

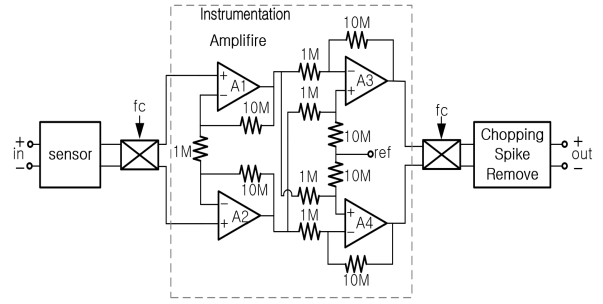


그림 6. 제안하는 초퍼 증폭기 구조
Fig. 6. Structure of proposed chopper amplifier.

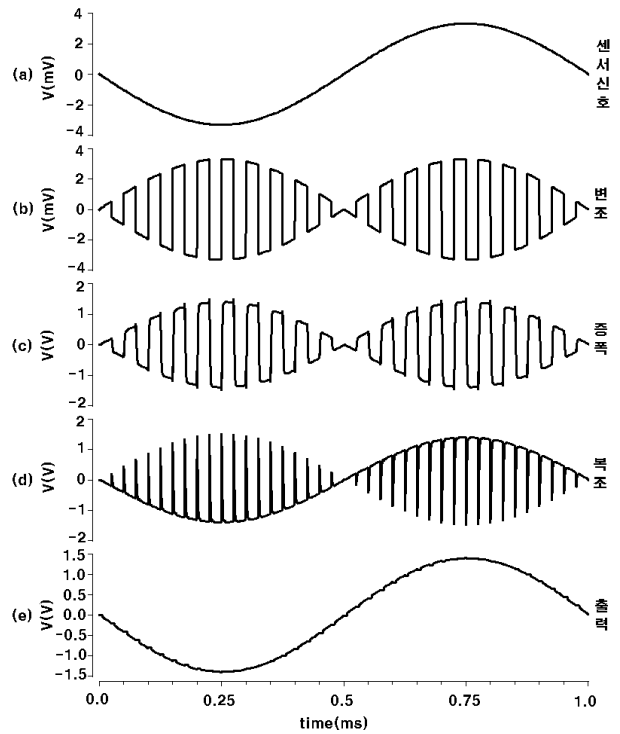


그림 7. 제안하는 초퍼 증폭기의 동작
(a)센서신호 (b)변조신호 (c)증폭신호 (d)복조신호 (e)출력신호
Fig. 7. Operations of proposed chopper amplifier
(a)Sensor signal (b)Modulated signal (c)Amplified signal (d)Demodulated signal (e)Output signal

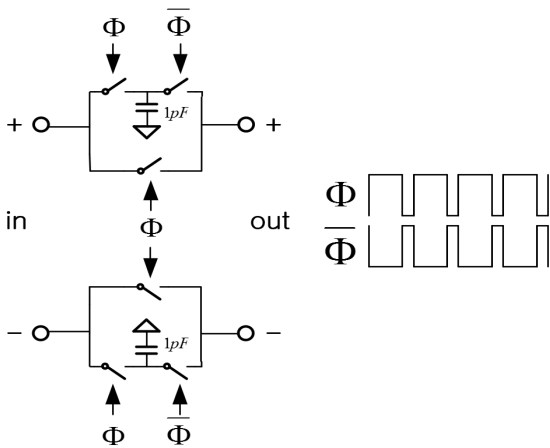


그림 8. 제안하는 초핑 스파이크 제거 회로
Fig. 8. Proposed chopping spike remove circuit.

2. 초핑 스파이크 제거 회로

제안하는 sample and hold 방식의 초핑 스파이크 제거 회로는 그림 8과 같이 각 단에 스위치 3개와 한 개의 커패시터로 구성되어 있다.

제안하는 초핑 스파이크 제거 회로의 동작은 초핑 스파이크 발생 여부에 따라 두 개의 페이즈로 나뉜다. Φ 페이즈는 초핑 스파이크가 없는 경우로 입력 신호를 출력으로 넘겨주는 동시에 커패시터에 신호를 저장한다. $\bar{\Phi}$ 페이즈는 초핑 스파이크가 발생한 경우로, 입력 신호를 차단하고 커패시터에 저장되어 있는 값을 출력한다. 홀드 동작을 하는 $\bar{\Phi}$ 페이즈는 초핑 주파수에 의해 결정된다. 제안하는 방식은 초핑 스파이크 발생 시 홀드 된 신호를 출력하여 초핑 스파이크만을 제거할 수 있어 LPF에 비해 신호의 감쇄가 없다. 또한 LPF에 사용되는 저항과 커패시터의 면적에 비해 적은 면적으로 구현할 수 있다.

V. 시뮬레이션 결과

1. 시뮬레이션 결과

제안하는 sample and hold 방식의 초핑 스파이크 제거 회로를 사용한 초퍼 증폭기의 동작을 Cadence사의 Spectre를 사용하여 시뮬레이션 하였다. 본 논문에서는 CMOS 0.35 μ m library를 사용하여 동작을 검증하였다.

그림 9는 제안하는 초퍼 증폭기의 시뮬레이션 결과이다. 각 출력은 각 입출단의 (+)와 (-)의 차동 출력이다. 출력 신호는 37.63(dB)의 SNR을 갖고 있으며, 복조된 출력과 같은 1.39(V)의 진폭을 가진 신호이다. 초퍼 유무에 따른 잡음 스펙트럼 밀도를 그림 10에 나타

내었다. 초퍼를 적용하였을 때 1m~1k 구간에서 잡음은 $4.13\mu V^2$ 이고 초퍼가 없는 경우는 같은 구간에서 $54.19\mu V^2$ 의 잡음이 존재하는 것을 확인할 수 있다.

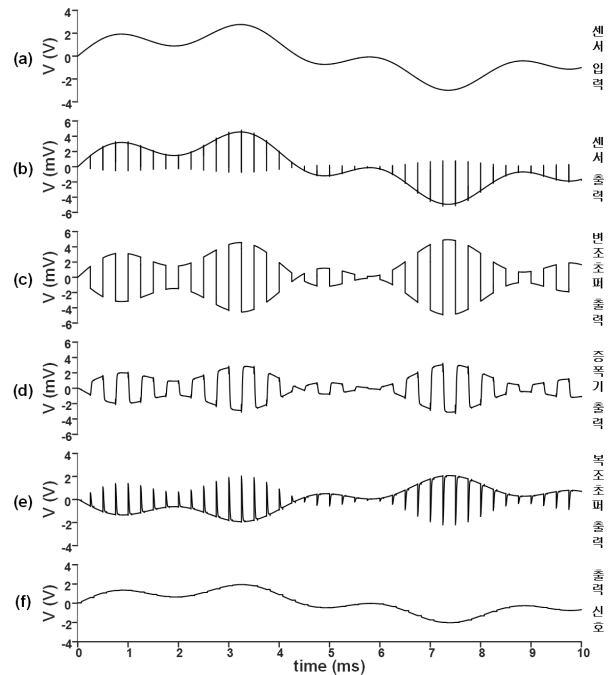


그림 9. 제안하는 초퍼 증폭기의 시뮬레이션 결과
(a)센서 입력 (b)센서 출력 (c)변조초퍼 출력 (d) 증폭기 출력 (e)복조초퍼 출력 (f)출력 신호

Fig. 9. Simulation result of proposed chopper amplifier
(a)Sensor input (b)Sensor output (c)Modulation chopper output (d)Amplifier output (e)Demodulation chopper output (f)Output signal

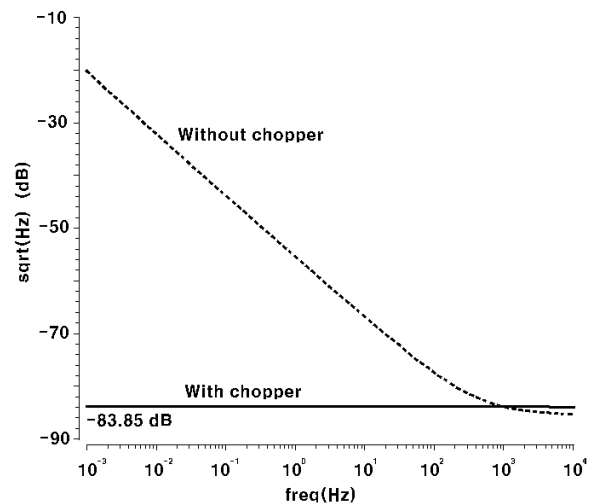


그림 10. 초퍼 유무에 따른 잡음 비교
Fig. 10. Comparison of noise depending on chopper existence.

2. 성능 비교

표 1은 기존의 LPF를 사용하는 초퍼 증폭기와 제안하는 초퍼 증폭기를 SNR, 신호 진폭, 면적을 비교하였다. 증폭기는 동일한 계측 증폭기를 사용하였으며 시물레이션은 CMOS 0.35 μ m 공정으로 진행하였다. LPF 초퍼 증폭기는 3kHz와 1.6kHz 의 -3dB 포인트를 가진 2가지와 비교하였다.

표 1. LPF 초퍼 증폭기와 제안하는 초퍼 증폭기 비교
Table1. Comparison of chopper amplifier with LPF and proposed chopper amplifier.

	SNR(dB)	출력신호 진폭(V)	면적(μ m ²)	소모전력 (mW)
LPF(3kHz) Chopping Amplifier	32.88	1.16	1409k	3.87
LPF(1.6kHz) Chopping Amplifier	37.37	1.02	1451k	3.87
Sampl and hold Chopping Amplifier (Proposed)	37.63	1.39	1297k	3.87

제안한 회로는 3kHz LPF 회로 보다 SNR은 14%, 신호 진폭은 20% 증가하였고 면적은 18% 감소하였다. 동일한 SNR을 가진 1.6kHz LPF 회로와 비교하여 신호 진폭은 36% 증가하고, 면적은 11% 감소한 것을 볼 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 센서신호용 초퍼안정화기법을 적용한 저잡음 계측증폭기를 제안하였다. 센서신호는 신호의 크기가 작아 잡음에 취약하고 저주파수대역에서 동작하는 신호가 많다. 저주파수대역에서 동작하는 신호들은 능동소자를 거치며 플리커 잡음에 많은 영향을 받기 때문에 초퍼를 증폭기의 입력단과 출력단에 두어 초핑 동작을 통해 플리커 잡음영향을 피할 수 있도록 초퍼 증폭기로 설계하여, 1m~1k (Hz) 구간에서 64.26 μ V_{rms} 잡음이 나타났다. 제안된 초퍼 증폭기는 기존의 초퍼 증폭기에서 초핑 스파이크를 제거하기위해 사용하는 LPF대신 sample and hold 방식으로 초핑 스파이크를 제거함으로써 LPF에서 발생하는 신호의 전압감쇄를 줄이고 면적을 줄일 수 있었다. 같은 SNR를 갖는 1.6kHz

3dB 대역폭 LPF와 비교하여 신호진폭은 36% 증가하였고, 면적은 11% 감소하였다. 본 논문은 비교적 크기가 큰 증폭기를 사용하여 면적 감소율이 적었으나 면적이 작은 증폭기를 사용할수록 면적에 대한 장점이 부각될 것이다.

REFERENCES

- [1] Hosung Lee, Sungyoung Lee, "Real-time Activity and Posture Recognition with Combined Acceleration Sensor Data from Smartphone and Wearable Device", Journal of KISS : Software and Applications 41(8), pp. 586-597, Aug. 2014.
- [2] Chang Hyun Kim, Jong-Moon Chung, "Design of a 6-Axis Inertial Sensor IC for Accurate Location and Position Recognition of M2M/IoT Devices", The Journal of The Korean Institute of Communication Sciences 39(1), pp. 82-89, Jan, 2014.
- [3] H. Sun, K. Jia, X. Liu, G. Yan, Y. Hsu, R. M. Fox, and H. Xie, "A CMOS-MEMS gyroscope interface circuit design with high gain and low temperature dependence," IEEE Sensors J., vol. 11, no. 11, pp. 2740-2748, Nov. 2011.
- [4] Jun-Gyu Lee, JinWook Burm, Shin-II Lim, "A Design of Instrumentation Amplifier using Offset Cancellation Techniques", THE INSTITUTE OF ELECTRONICS ENGINEERS OF KOREA, pp. 534-535, Nov. 2007.
- [5] Haiyang Cheng, Ming Qin, Donghui Gao, Qing-An Huang, "A low noise CMOS instrumentation amplifier for integrated thermal gas flow sensor", Solid-State and Integrated Circuits Technology, 2004. Proceedings. 7th International Conference on (Volume:3), 1831-1834 vol.3, Oct. 2004.
- [6] K.A.A Makinwa and J.H. Huijsing, "A wind sensor with an integrated low-offset instrumentation amplifier", Electronics, Circuits and Systems, 2001.ICECS 2001. The 8th IEEE International Conference, vol.3, pp.1505-1508, 2001.
- [7] Xiao Yang, Qi Cheng, Li-fei Lin, Wei-wei Huang, "Design of low power low noise amplifier for portable electrocardiogram recording system applications", Anti-Counterfeiting, Security and Identification (ASID), 2011 IEEE International Conference on, pp.89-92, June 2011.
- [8] CHRISTIAN C.ENZ, GABORC. TEMES, "Circuit Techniques for Reducing the Effects of Op-Amp Imperfections: Autozeroing, Correlated Double sampling, and Chopper Stabilization" Proceedings

of the IEEE, pp. 1584-1614 Nov 1996.

- [9] J. H. Nielsen, and E. Bruun, "A CMOS low-noise instrumentation amplifier using chopper modulation," Analog Integrated Circuit and Signal Processing, vol. 42, pp. 65-76, 2005.

저 자 소 개



박 영 민(학생회원)
2014년 충북대학교 정보통신공학과 학사 졸업.
2016년 충북대학교 정보통신공학과 석사 졸업.
<주관심분야: 저잡음 증폭기 설계, FPGA, 저전력 회로설계>



남 민 호(학생회원)
2013년 충북대학교 정보통신공학과 학사 졸업.
2015년 충북대학교 정보통신공학과 석사 졸업.
<주관심분야: 저전력 고속 회로설계, CMOS Image Sensor>



조 경 록(정회원)
1977년 경북대학교 전자공학과 학사 졸업.
1989년 일본 동경대학교 전자공학과 석사 졸업.
1992년 일본 동경대학교 전자공학과 박사 졸업.

1979년~1986년 (주)금성사TV연구소 선임연구원.
1999년, 2005년 Oregon State University 객원교수.
1992년~현재 충북대학교 전자정보대학 교수.
2010년~현재 IDEC 충북대지역센터장
<주관심분야: 통신시스템 LSI 설계, 저전력 고속 회로설계, Platform 기반의 SoC 설계>