

이진 탐색 알고리즘을 이용한 능동 노이즈 제거용 보정 계수 고속 적용 기법

안중현¹ · 박대진^{2*}

Fast Adaptation Techniques of Compensation Coefficient of Active Noise Canceller using Binary Search Algorithm

Joonghyun An¹ · Daejin Park^{2*}

¹Senior Engineer, SK Hynix Semiconductor, Icheon, 17336 Korea

^{2*}Associate Professor, School of Electronic Engineering, Kyungpook National University, Daegu, 41566 Korea

요 약

능동 노이즈 제어 시스템이 내장되어 있는 휴대용 시스템은 저전력 구동이 요구된다. 능동 노이즈 제어를 위한 과도한 안티 노이즈 탐색 동작은 내장 배터리의 빠른 전력 소모를 발생시킨다. 시스템의 동작 조건에 따라 적응적으로 노이즈를 제거 할 수 있는 방법이 요구되며, 전력 소모를 줄이는 방법은 오늘날의 휴대용 시스템에서 매우 중요한 핵심 기능이 되고 있다. 본 논문에서는 다양한 노이즈가 입력될 수 있는 시스템에서 이진 탐색 알고리즘을 이용한 고속 능동 노이즈 제어(Active Noise Control, ANC) 방법을 제안한다. 연구를 위해 구현된 아키텍처는 입력 신호로부터 노이즈로 간주되는 주파수 성분을 감지하고, 이진 탐색 알고리즘을 이용하여 일반적인 선형 탐색 알고리즘 보다 훨씬 더 빠른 속도로 안티 노이즈 생성을 위한 적절한 진폭 값을 찾게 된다. 실험 결과를 통해 제안한 알고리즘의 동작이 성공적으로 수행함을 확인하였다.

ABSTRACT

Portable systems with built-in active noise control is required low power operation. Excessive anti noise search operation can lead to rapid battery consumption. A method that can adaptively cancel noise according to the operating conditions of the system is required and the methods of reducing power are becoming very important key feature in today's portable systems. In this paper, we propose the method of active noise control(ANC) using binary search algorithm in noisy systems. The implemented architecture detects a frequency component considered as noise from the input signal and by using the binary search algorithm, the system find out an appropriate amplitude value for anti-noise in a much faster time than the general linear search algorithm. Through the experimental results, it was confirmed that the proposed algorithm performs a successful functional operation.

키워드 : 능동 노이즈 제어, 저전력 노이즈 제거, 고속 노이즈 제어, 저전력 임베디드 시스템

Keywords : Active noise control, Active noise reduction, Low-power embedded system, Low-power noise canceller

Received 10 September 2021, Revised 15 September 2021, Accepted 24 September 2021

* Corresponding Author Daejin Park (E-mail:boltanut@knu.ac.kr, Tel:+82-53-950-5548)

Assistant Professor, School of Electronic Engineering, Kyungpook National University, Daegu, 41566 Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2021.25.11.1635>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

© This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서론

일반적인 능동 노이즈 제어 기법이 적용된 임베디드 시스템에서는 입력이 예상되는 노이즈 신호의 크기, 위상, 주파수 등의 정보를 바탕으로 신호처리 모델링 및 시뮬레이션을 거쳐 해당 노이즈 제거에 적합한 보상 계수(Compensation Coefficient)를 찾아 상수화하고, 이를 FW로 제작하여 온 칩에 임베디드한다.

임베디드 시스템은 FW 프로그래밍이 가능하다는 장점이 있지만, 한번 프로그래밍 되어 어플리케이션에 탑재된 이후에 다시 해당 FW를 업데이트 하기에는 어려움이 있어 예측하지 못한 노이즈 신호 입력 조건이 추가 되었을때 이를 대처하기 위한 솔루션으로는 적합하지 않다 [1]. 이로 인해 다양한 형태의 주변 소음이 입력되는 상황에서 Runtime에 빠르게 대응할 수 있는 기법 적용이 필요하다 [2].

그림 1은 능동 노이즈 제어 기법이 적용된 이어폰으로 다양한 형태의 주변 소음이 입력 되는 경우, 이에 대응되는 안티 노이즈를 생성해줌으로써[3] 인간의 귀는 노이즈가 제거된 깨끗한 상태의 음원 혹은 통화음을 들을 수 있도록 해주는 과정을 보여준다.

본 논문에서는 그림 1과 같이 다양한 형태의 입력 노이즈 신호에 대한 능동 노이즈 제어 기법이 임베디드 시스템에 맞게 경량화될 수 있는 방법을 연구하였다. 그 방법 중 하나로 노이즈 보상 계수를 Look-up 테이블 형

태로 미리 설정해두고 [4], 해당 테이블로부터 필요한 보상 계수를 이진 탐색 기법을 도입하여 Runtime에 빠르게 대응할 수 있는 방법을 제안한다. 또한 해당 알고리즘이 일반적인 선형 탐색 기법에 비해 얼마나 더 좋은 효율성을 가지는지 실험을 통해 알아보도록 한다.

II. 관련 연구

신호의 노이즈를 제거하는 방법에는 수동 노이즈 제어와 능동 노이즈 제어의 두 가지 방법이 있다[5]. 수동 노이즈 제어 방법은 노이즈 소스를 격리하고 절연체, 방음벽 등과 같이 시스템에 노이즈가 유입 되는 것을 원칙적으로 차단하게 된다. 그러나 이러한 방법은 비용이 많이 들고 시스템의 복잡도가 크다는 단점을 가진다. 능동 노이즈 제어는 마이크로 입력되는 주변 노이즈와 동일한 주파수에 위상만 180° 틀어진 안티 노이즈를 발생시켜 입력 노이즈를 상쇄시키는 구조이다[6,7]. 능동 노이즈 제어 기법의 경우 수동 노이즈 제어 기법에 비해 시스템의 구현 복잡도가 낮고, 비용이 저렴하다는 장점으로 인해 휴대용 어플리케이션에 자주 사용된다[8].

배터리로 구동하는 휴대용 어플리케이션은 저전력 구동이 시스템 동작의 중요한 요소이므로, 능동 노이즈 제어 기법이 내장된 시스템에서 해당 동작에 소모되는 전력을 최소화 할 수 있는 기법이 요구되고 있다.

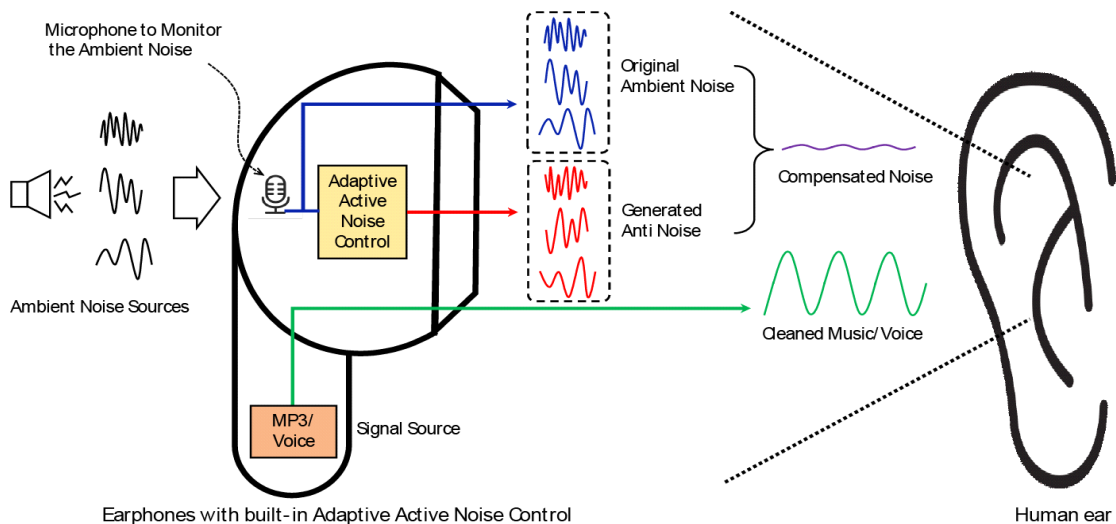


Fig. 1 Structure of earphones with built-in ANC

III. 아키텍처 제안

본 논문의 최종 목표는 안티 노이즈를 생성 시 노이즈와 동일한 크기의 진폭 값을 고속으로 탐색하여 노이즈 보상 계수(Compensation Coefficient)를 찾고, 이를 활용하여 능동 노이즈 제어를 수행하는 것이다. 이를 위해 이진 탐색 알고리즘을 적용하여 노이즈 신호와 동일한 크기의 진폭 값을 찾도록 하였다. 설명의 편의를 위해 노이즈와 같은 크기의 진폭 값을 K 라고 명명하기로 하고, 능동 노이즈 제어를 위한 이진 탐색 과정에 대한 흐름도를 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.

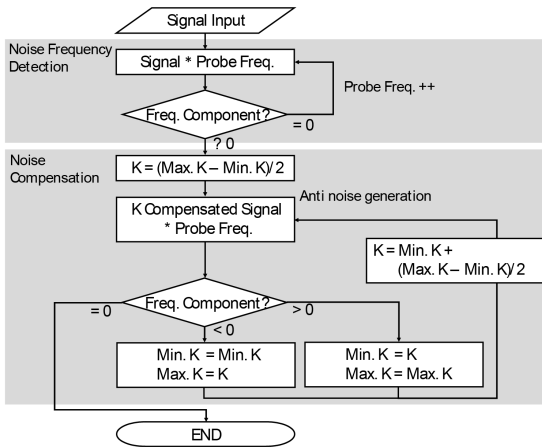


Fig. 2 K binary search flowchart for active noise control

제안하는 아키텍처는 입력 신호로부터 노이즈로 간주되는 주파수 성분의 신호가 포함되어 있는지를 검출하는 노이즈 주파수 검출부(Noise Frequency Detection)와 검출된 노이즈의 주파수 성분에 대해 이진 탐색 기법을 이용하여 검출된 노이즈와 동일한 크기의 진폭인 K 를 찾아 안티 노이즈를 생성하여 노이즈를 보상하는 노이즈 보상부(Noise Compensation)로 구성 된다.

3.1. Noise Frequency Detection

입력의 $f(n)$ 이라는 신호로부터 X 라는 주파수 성분을 검출하기 위해서는 X 주파수 성분을 갖는 정현파 신호와 $f(n)$ 신호와의 내적(dot product) 연산을 하도록 한다. 이럴 경우, X 주파수 성분 갖는 신호를 제외한 나머지 주파수의 신호에 대해서는 그 결과 값이 “0” 된다. 이를 통해 $f(n)$ 신호에 X 주파수 성분의 포함 유무를 확인할 수 있다.

이러한 주파수 특성을 노이즈 주파수 검출부에 적용하여, 노이즈로 간주되는 신호와 동일한 주파수의 신호를 순차적으로 입력하고, 이 신호와 입력신호와의 내적 연산을 통해 해당 주파수 성분을 포함하는지 아닌지 판단하여 노이즈를 검출하게 된다. 즉, 입력 신호와 노이즈로 간주되는 probe frequency 신호간의 내적 연산 결과가 “0”이 아니면 입력 신호는 probe frequency와 동일한 주파수 성분의 노이즈를 포함하고 있음을 의미한다.

Algorithm 1은 노이즈 주파수 검출 동작에 대한 과정을 슈도 코드로 표현 하였다. 여기서 노이즈 주파수 성분을 검출하기 위한 내적 연산은 식 1과 같다.

$$F_c = \sum_{t=0}^{\infty} S_i \cdot P_f \quad (1)$$

즉, F_c 값이 “0” 이 아닌 값을 가지면 검출부에 입력 신호는 P_f 와 동일한 주파수 성분을 포함하고 있다는 것을 의미한다.

Algorithm 1 Noise Frequency Detection

```

1:  $S_i$  : Signal input
2:  $P_f$  : Probe frequency
3:  $F_c$  : Frequency component

4: procedure NOISE FREQUENCY DETECTION( $S_i, F_c$ )
5:   while  $F_c = 0$  do
6:      $P_f =$  start value of search frequency
7:      $F_c = \sum S_i \cdot P_f$ 

8:   if  $F_c \neq 0$  then
9:      $S_i$  contains the same frequency noise as  $P_f$ 
10:    break
11:   else
12:      $P_f ++$ 
13:   end if
14: end while
15: return  $P_f$ 
16: end procedure
    
```

3.2. Noise Compensation

노이즈 주파수 검출부를 통해 검출된 노이즈는 노이즈 보상부(Noise Compensation) 로직을 통해 해당 노이즈가 보상되는 과정을 거치게 된다. 노이즈 보상을 위해 검출된 노이즈와 동일한 주파수를 가지며 위상만 180° 틀어진 안티 노이즈를 생성하고, 생성된 안티 노이즈와 입력 신호와의 합을 통해 노이즈 성분이 상쇄되어 없게 된다. 안티 노이즈 생성시 중요한 요소는 해당 신호에 대한 적절한 진폭 값이 설정 되어야만 노이즈 성분

을 완전히 제거할 수 있다는 것이다. 여기서 적절한 진폭 값이란 노이즈 신호와 동일한 크기의 진폭 값을 가지는 것을 의미하게 된다.

K 값의 보다 빠른 탐색 동작을 위해 이진 탐색 알고리즘이 적용되었으며, 해당 탐색 동작에 대한 개념적 원리에 대해 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.

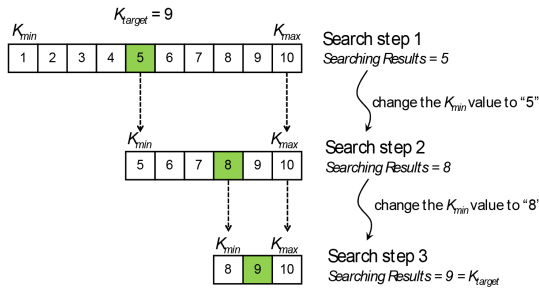


Fig. 3 K Binary search diagram

이진 탐색을 위해 시스템이 가질 수 있는 최대 진폭의 반값을 초기 K 값으로 설정하고, 노이즈와 동일한 주파수를 가지며 위상이 180° 틀어진 신호를 생성하여 이를 입력 신호에 더해준 신호가 초기 보상된 신호가 된다. 노이즈 주파수 검출부에 적용된 방법과 동일하게 “임의의 $f(n)$ 이라는 신호로부터 X 라는 주파수 성분을 검출하기 위해서는 X 주파수 성분을 갖는 정현파 신호와 $f(n)$ 신호와 내적(dot product) 연산을 하도록 한다.”는 주파수 특성을 적용하여 초기 보상된 신호와 노이즈 주파수 검출부에서 검출된 probe frequency와의 내적 연산을 진행하여 그 결과에 따라 완전한 노이즈 보상 동작이 이루어졌는지를 판별하게 된다.

Probe frequency와 보상된 신호와의 내적 결과가 “0”이 아닌 경우, Maximum K 값과 Minimum K 값은 내적 결과의 부호(+/-)에 따라 재설정된 후 연산을 반복하여 새로운 보상 신호를 생성하게 된다. 만약 내적의 결과가 “0”이면 노이즈 성분과 동일한 진폭 값을 가지는 최적의 K 값에 대한 탐색이 완료되었음을 의미한다.

Algorithm 2는 노이즈 보상 동작에 대한 과정을 슈도 코드로 표현 하였다. 여기서 이진 탐색을 위한 초기 K 값은 식 2와 같이 시스템에서 가질 수 있는 최대 진폭 값의 절반 크기로 설정하여 탐색 동작을 시작하게 된다.

$$K_{initial} = \frac{K_{max} - K_{min}}{2} \quad (2)$$

초기 K 값을 적용한 보상 신호 C_s 와 노이즈 주파수 검출부에 의해 검출된 P_f 신호와의 내적 연산 결과인 F_c 의 값에 따라 다음 동작이 선택된다. F_c 가 “0”이 아닌 경우 그 부호에 따라 K_{min} , K_{max} 값은 업데이트되고, 식 3에 의해 다음 K 값이 다시 설정된다. 이를 통해 이진 탐색 동작이 완성되게 되고, F_c 가 “0”이 될 때까지 해당 동작을 반복하게 된다.

$$K_{next} = K_{min} + \frac{K_{max} - K_{min}}{2} \quad (3)$$

Algorithm 2 Noise Compensation

- 1: S_i : Signal input
- 2: P_f : Probe frequency
- 3: $P_{f\phi}$: The phase of the P_f signal is shifted by 180 degrees
- 4: F_c : Frequency component
- 5: C_s : Compensated signal
- 6: K : Amplitude of anti noise signal
- 7: K_{min} : Minimum amplitude of K
- 8: K_{max} : Maximum amplitude of K

```

9: procedure NOISE COMPENSATION( $S_i, C_s$ )
10:    $K = (K_{max} - K_{min})/2$ 
11:   while  $F_c \neq 0$  do
12:      $C_s = S_i + K \cdot P_{f\phi}$ 
13:      $F_c = \sum C_s \cdot P_f$ 
14:     if  $F_c < 0$  then
15:        $K_{min} = K_{min}$ 
16:        $K_{max} = K$ 
17:     else if  $F_c > 0$  then
18:        $K_{min} = K$ 
19:        $K_{max} = K_{min}$ 
20:     else if  $F_c = 0$  then
21:       Optimal  $K$  value search completed
22:       break
23:     end if
24:      $K = K_{min} + (K_{max} - K_{min})/2$ 
25:   end while
26:   return  $C_s$ 
27: end procedure
    
```

IV. 구현 및 실험 결과

K 이진 탐색 알고리즘에 대한 테스트를 위해 그림 4와 같은 시스템을 C언어로 구현하였다. High frequency 대역의 노이즈 성분은 Low Pass Filter를 적용하여 필터링 될 수 있도록 하였고, Low Pass Filter로 제거하기 어려운 middle frequency 대역의 노이즈 성분에 대해서는

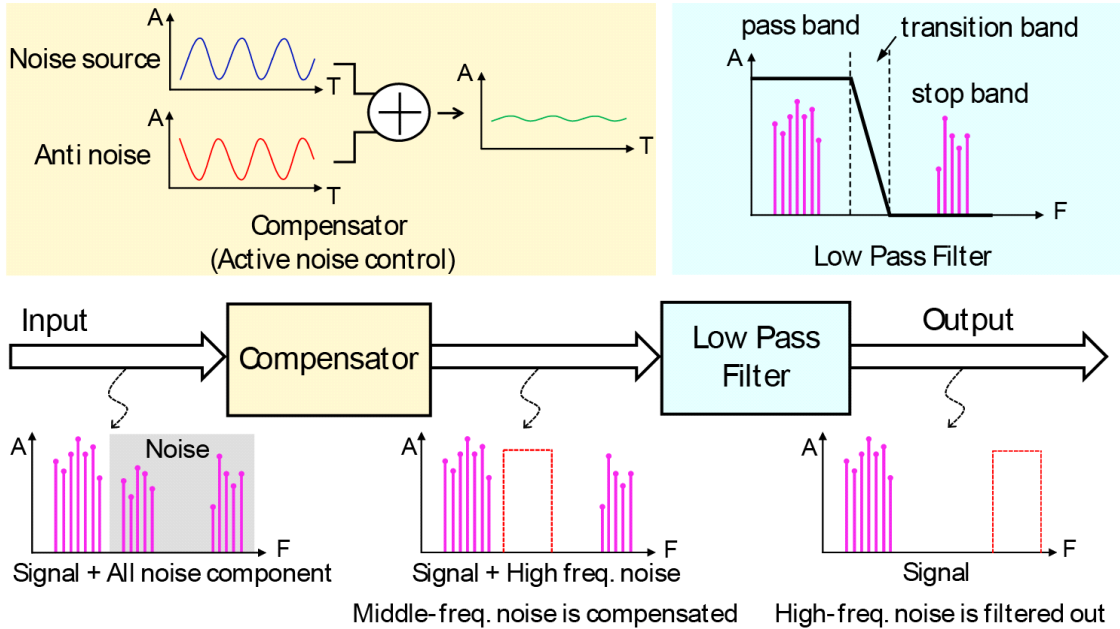


Fig. 4 The progress of noise canceling

능동 노이즈 제거 방식이 적용된 compensation 로직을 구현하였다.

이진 탐색 알고리즘의 효율성을 확인하기 위해 해당 알고리즘을 적용한 경우와 일반 선형 탐색 알고리즘을 적용한 경우를 설정하여 테스트를 진행하였다. 임의의 주파수 대역을 노이즈로 가정하고, compensation 로직을 통해 해당 노이즈의 주파수 성분이 zero가 되도록 하는 K 값을 탐색하는데 소요되는 횟수를 측정하였다. 측정된 결과를 바탕으로 그림 5와 같은 그래프를 얻을 수 있었다. 일반적인 선형 탐색 알고리즘을 적용할 경우 약 700회의 탐색 동작을 반복한 끝에 기대하는 K 값의 탐색을 완료한 반면, 이진 탐색 알고리즘을 적용할 경우 단 9회의 탐색 동작만으로 기대하는 K 값의 탐색 동작이 완료되어 탐색 성능이 월등함을 알 수 있다.

구현된 시스템에 노이즈가 포함된 신호를 입력했을 때, 노이즈 보정을 위한 K 값에 따른 Compensator 및 Low Pass Filter의 각 출력 신호는 그림 6과 같다.

High frequency 성분과 middle frequency 성분을 모두 포함하고 있는 입력 신호인 "noisy signal"은 먼저 compensation 로직을 통해 middle frequency 성분이 제거된 "compensated signal" 신호로 출력되며, 이 출력 신호를 다시 Low Pass Filter에 통과시켜 high frequency

성분이 제거된 "filtered signal"가 최종 출력 된다.

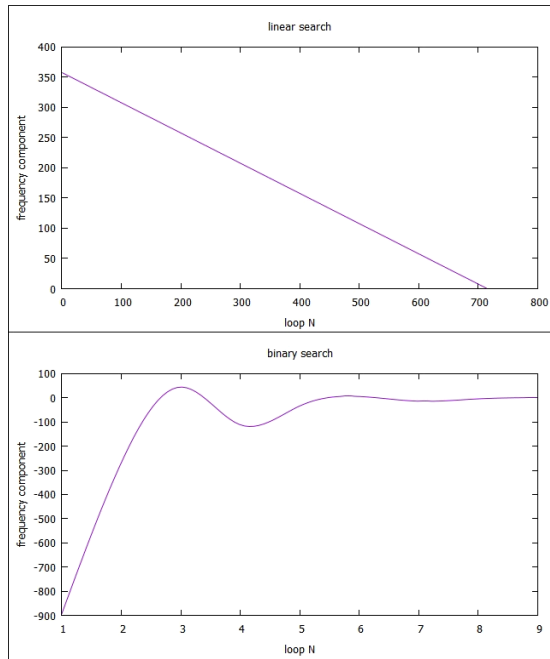


Fig. 5 Comparison of loop counts in binary vs linear search

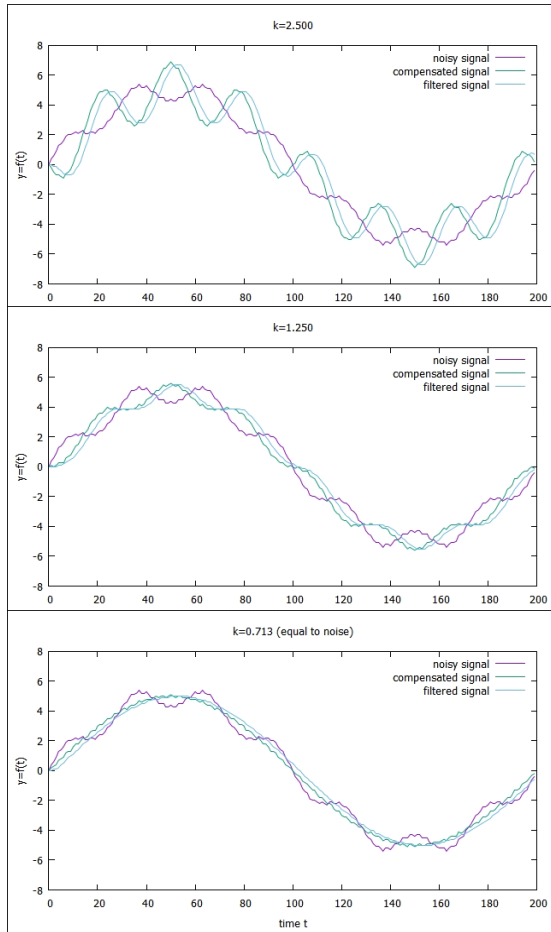


Fig. 6 The output waveform according to K value

K 설정값과 입력된 노이즈의 진폭과의 차이가 클수록 compensation 로직과 Low Pass Filter 출력은 더 불안정한 것을 알 수 있으며, 이진 탐색 알고리즘으로 얻은 입력 노이즈 진폭과 동일한 크기의 K 값을 설정하였을 때 안정적인 출력 신호가 생성됨을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문은 신호 노이즈 제거에 사용되는 방법 중 하나로 휴대용 어플리케이션용 임베디드 시스템에 자주 사용되는 능동 노이즈 제어 기법을 소개하고, 노이즈 제거에 필요한 보상과인 안티 노이즈 생성의 최적화 방법을 제안하였다.

인공지능 프로세싱이나 정밀한 신호처리 기법을 도입하여 예측하지 못한 노이즈에 대해 대응하는 안전한 시스템을 구축할 수 있겠지만 구현의 복잡도가 높고 시스템이 무거워 임베디드 시스템에 적용하기에는 오버헤드가 크므로 좀 더 심플하고 시스템을 경량화 할 수 있는 방법이 필요하다.

필터의 제어 계수인 보상과 진폭의 크기를 조절함으로써 제어 필터의 변형을 빠르게 하여 다양한 형태의 입력 노이즈에 대해 고속 대응할 수 있는 방안을 모색하였고, 이를 위해 필터의 제어 계수를 Look-up 테이블 형태로 설정해두고 이를 이진 탐색 알고리즘을 적용하여 탐색의 오버헤드를 최소화 함으로써 임베디드 시스템의 경량화 및 제한된 CPU 성능으로 고속 동작이 가능하게 할 수 있었다.

구현된 실험 결과를 통해 일반적으로 사용되는 선형 탐색 알고리즘에 비해 N 개의 원소에 대해 $\log(N)$ 만큼의 탐색 시간을 줄여줌으로써 훨씬 향상된 속도로 탐색 동작이 완료됨을 알 수 있었고, 이는 시스템의 동작 시간을 줄여 전력 소모를 줄이는 효과를 가질 수 있음을 유추할 수 있다[9].

이번 보상 필터의 제어 파라미터 탐색 알고리즘 연구를 통해 확인된 실현 가능성을 바탕으로 실질적인 하드웨어 구현을 통한 고속 저전력 구동에 관한 차기 연구가 진행될 예정이다.

ACKNOWLEDGEMENT

This study was supported by the BK21 FOUR project funded by the Ministry of Education, Korea (4199990113966, 10%), Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science and ICT (NRF-2019R1A2C2005099, 10%), and Ministry of Education (NRF-2018R1A6A1A0302 5109, 10%). This work was partly supported by Institute of Information and communications Technology Planning and Evaluation (IITP) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. 2021-0-00944, Metamorphic approach of unstructured validation/verification for analyzing binary code, 70%).

REFERENCES

[1] J. S. Kwon, M. G. Seok, and D. J. Park, "Low-Power Fast Partial Firmware Update Technique of On-Chip Flash Memory for Reliable Embedded IoT Microcontroller," *IEICE Transactions on Electronics*, vol. E104-C, no. 6, pp. 226-236, 2021.

[2] J. S. Kwon, M. G. Seok, and D. J. Park, "User Insensible Sliding Firmware Update Technique for Flash-Area/Time-Cost Reduction toward Low-Power Embedded Software Replacement," in *2020 IEEE COOLChips*, 2020.

[3] A. K. Sugiyama, R. Miyahara, and K. Oosugi, "A noise robust hearable device with an adaptive noise canceller and its dsp implementation," in *2019 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, pp. 1-2, 2019.

[4] J. S. Kwon, J. H. Cho, and D. J. Park, "Function Block-Based Robust Firmware Update Technique for Additional Flash-Area/Energy-Consumption Overhead Reduction," in *2019 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS)*, pp. 1-2, 2019.

[5] A. Goel, A. Vetteth, K. R. Rao, and V. Sridhar, "Active cancellation of acoustic noise using a self-tuned filter," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 51, no. 11, pp. 2148-2156, 2004.

[6] S. M. Kuo, S. Mitra, and W. S. Gan, "Active noise control system for headphone applications," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 14, no. 2, pp. 331-335, 2006.

[7] T. Z. Wang, T. Jin, Z. M. Lu, C. Zhang, G. Q. Liu, X. Zhao, and C. Li, "Research on active noise control method compensating for acoustic metamaterial noise barrier in transformer noise reduction," in *2018 IEEE 2nd International Electrical and Energy Conference (CIEEC)*, pp. 648-652, 2018.

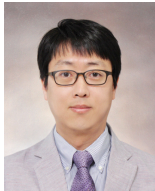
[8] B. Reshma and K. A. Kiran, "Active noise cancellation for in-ear headphones implemented on fpga," in *2017 International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)*, pp. 602-606, 2017.

[9] D. J. Park and J. H. Cho, "Low-power universal edge tracer architecture using accuracy-controlled resource reallocation for event-driven sensing applications," *Procedia Computer Science*, vol. 56, no. 1, pp. 67-73, 2015.



안중현(Joonghyun An)

2000년~2007년: 충북대학교 전자공학과 학사
 2015년~2017년: 경북대학교 전자공학과 석사
 2007년~2012년: ABOV 반도체 선임 연구원
 2012년~현재: SK Hynix 책임 연구원
 ※관심분야: 경량화된 임베디드 시스템 기반 ANC, 저전력 SoC 설계, Robust 임베디드 시스템



박대진(Daejin Park)

2001년: 경북대학교 전자전기공학부 학사
 2003년: KAIST 전기 및 전자공학과 석사
 2014년: KAIST 전기 및 전자공학과 박사
 2003년~2014년: SK Hynix/ Samsung/ABOV반도체 (차세대 LSI 설계) 수석연구원
 2014년~2016년: 경북대학교 전자공학부 연구조교수 (2014년 대통령 Postdoctoral Fellow 선정)
 2016년~현재: 경북대학교 전자공학부 조교수/부교수
 ※관심분야: 저전력 SoC 설계, 하드웨어-소프트웨어 Co-design, Dependable 스마트 IoT 시스템, Robust 임베디드 시스템, 인공지능 내장형 시스템-소프트웨어 온칩 통합