

특집논문-06-11-2-06

## 음성통신망에서 디지털 오디오 신호 음질개선을 위한 전처리방법

송근배<sup>a)†</sup>, 안철용<sup>a)</sup>, 김재범<sup>a)</sup>, 박호종<sup>b)</sup>, 김석호<sup>a)</sup>

## Preprocessing method for enhancing digital audio quality in speech communication system

Geun-bae Song<sup>a)†</sup>, Chul-Yong Ahn<sup>a)</sup>, Jae Bum Kim<sup>a)</sup>, Ho-chong Park<sup>b)</sup> and Austin Kim<sup>a)</sup>

## 요약

본 논문은 음성 부호화기에서 입력 오디오 신호가 보다 효과적으로 처리되도록 하기 위해 입력오디오신호를 전 처리하는 방법을 소개한다. 이를 위해 본 논문은 잡음억제 및 적응이득제어 방법을 도입한다. 여기서 입력 오디오 신호는 잡음 부가된 신호로 간주되며 그 오디오 신호의 부호화오차신호는 부가된 잡음신호로 간주된다. 입력 오디오 신호는 기존의 잡음억제 방식에 따라 잡음신호 즉, 부호화 오차신호가 억제된 뒤 적응이득제어기를 거쳐 최종적으로 음성 부호화기에 인가된다. 결과적으로 이러한 동작을 통하여 입력 오디오 신호의 주파수 스펙트럼 분포가 음성 부호화기 특성에 맞게 재배치된다. 이 방법의 하나의 단점은 부호화 오차를 계산하기 위해 사전에 추가적인 부호화 동작이 필요하다는 것이다. 반면, 이 방법은 일반적인 구조를 가지고 있으며 따라서 기존의 여러 음성부호화기에 쉽게 적용될 수 있다는 장점을 가진다. 주관적인 선호도 조사결과 제안된 방법이 복잡한 음악신호로 기인한 성가신 잡음을 사전에 억제해 주며 결과적으로 음질개선을 가져다준다는 것을 확인할 수 있었다.

## Abstract

This paper presents a preprocessing method to modify the input audio signals of a speech coder to obtain the finally enhanced signals at the decoder. For the purpose, we introduce the noise suppression (NS) scheme and the adaptive gain control (AGC) where an audio input and its coding error are considered as a noisy signal and a noise, respectively. The coding error is suppressed from the input and then the suppressed input is level aligned to the original input by the following AGC operation. Consequently, this preprocessing method makes the spectral energy of the music input redistributed all over the spectral domain so that the preprocessed music can be coded more effectively by the following coder. As an artifact, this procedure needs an additional encoding pass to calculate the coding error. However, it provides a generalized formulation applicable to a lot of existing speech coders. By preference listening tests, it was indicated that the proposed approach produces significant enhancements in the perceived music qualities.

Key words : noise suppression, adaptive gain control, preprocessing, audio quality enhancement

## I. 서론

a) 삼성전자

Samsung Electronics Co., LTD.,

b) 광운대학교 전자공학부

Department of Electronics Engineering, Kwangwoon University

† 교신저자 : 송근배(geunbae.song@samsung.com)

최근 들어 협대역 이동통신망을 통해 가입자에게 음악을 전송하는 서비스가 늘고 있다. 대표적인 예로 "음악 연결음

" 서비스를 들 수 있는데 이는 발신자가 상대방에게 전화를 건 뒤 호가 연결되기를 기다리는 동안 기존의 톤 연결음 대신 상대방이 미리 등록하여 놓은 음악을 들려주는 서비스이다. 현재 이 서비스가 성공을 거듭에 따라 사용자는 폭발적으로 증가하였으며 중국, 미국 등 다른 나라에도 보급되는 추세이다. 이와 같이 현대역 이동통신망을 통해 음악을 전송하고자 하는 수요가 증가함에 따라 음악음질개선의 필요성 또한 증가하고 있다. 하지만 현재 통신망에서 사용 중 음성부호화기들은 모두 인간의 음성생성모델에 근거하여 설계된 부호화기로 음성이 아닌 음악을 부호화할 경우 음질에 심각한 문제를 일으킨다. 특히, 다양한 악기음으로 이루어진 복잡한 음악의 경우 음성부호화기에 의해 제대로 처리 되지 못하고 결국 잡음처럼 성가신 소리로 변형되어 재생된다.

이 문제와 관련하여 그 동안 몇 가지 의미 있는 연구들이 있었다. 가령 R. Hagen과 그의 동료들은 기존 부호화기에서 사용하는 10차 선형예측모델의 한계를 극복하기 위해 독특한 후처리를 제안하였는데, 이는 복호화된 신호의 고조파특성(harmonic characteristic)을 분석하여 고조파의 골짜기에 해당하는 부분을 감쇠시켜 줌으로써 복호화된 신호의 고조파 구조가 원래 신호의 고조파 구조와 유사해지게끔 하는 방법이다<sup>[1]</sup>. 이를 통하여 제안한 방법은 음악신호처리에 의해 발생하는 부호화잡음을 상당히 줄일 수 있었으며 음질개선효과를 거둘 수 있었다. 그러나 좋은 결과에도 불구하고, 제안한 후처리 방법은 다소 경험적 방법(heuristic procedure)를 사용하고 있다는 문제점을 안고 있다. 따라서 보다 널리 적용될 수 있는 보다 일반화된 방법 개발의 필요하다. 또 다른 방법으로, [2]에서 제안된 전 처리 방법이 있다. 이 방법은 입력 오디오 신호 중에서 신호 레벨이 작은 부분들이 배경잡음으로 간주되어 부호화기에 의해 가장 작은 비트 율, 가령 EVRC의 1/8-rate 으로 처리되는 것을 방지하고자하는 장치이다<sup>[3]</sup>. 이를 위해 입력신호의 음폭을 조절하고, 빗살형 필터(comb filter) 형태의 피치 이득을 높여주는 방법이 제안되었다<sup>[2]</sup>. 낮은 부호화 비트 율로 인해 음의 중간에 끊긴 음이 발생하면 청취자에게 거슬리는 느낌을 주게 되는데 이를 완화시키는 것이 이 방법의 목표이다.

본 논문은 음성부호화기의 음악입력에 대한 성능을 개선시키기 위해 새로운 전 처리 방법을 제안한다. 이 방법은 잡음억제(noise suppression, NS) 및 자동이득제어 방법(adaptive gain control, AGC)에 기초를 두고 있다. 즉, 입력 오디오신호는 잡음 부가된 신호에, 그 오디오 신호의 부호화 오차신호는 잡음신호에 각각 대응되며 기존의 잡음억제 방법과 비슷한 과정을 통하여 부호화 오차신호가 입력 오디오 신호로부터 사전에 억제된다. 다음으로 자동이득제어기가 적용되어 잡음 억제된 입력 오디오 신호 레벨을 원래의 입력 오디오 신호 레벨로 끌어 올리게 되는데, 결과적으로 이러한 전체적인 전 처리 과정은 (미리계산 된) 부호화 오차신호 정보에 기반 하여 입력 오디오 신호의 주파수 분포를 재분배하는 효과가 있다. 실험결과 이러한 재분배 방식은 전 처리된 신호가 보다 효과적으로 부호화 되게끔 하여 주며 음질실험결과에서도 좋은 결과를 확인할 수 있었다.

## II. 제안하는 방법

일반적으로 입력 음성이 배경잡음에 의해 왜곡될 경우 이를 처리하는 음성부호화기의 성능은 저하된다. 이를 개선시키기 위한 방법으로 잡음억제기술이 음성부호화기의 전 처리기로서 사용 된다 [4]-[6]. 이 기술을 간단히 요약하면 다음과 같다. 즉,  $x[m]$ ,  $s[m]$ ,  $n[m]$ 를 각각 잡음 부가된 신호, 깨끗한 신호, 잡음신호라 할 경우 부가잡음에 의해 왜곡된 음성신호는 다음과 같이 모델링 된다:

$$x[m] = s[m] + n[m] \tag{1}$$

잡음억제기는 묵음구간마다 배경잡음  $n[m]$ 에 대한 정보를 추정하여 저장하고 있다가 유음구간에서 이를 활용하여 잡음 부가된 신호  $x[m]$ 로부터 추정된 잡음신호만큼을 (일반적으로 주파수영역에서) 적절히 억제해 주는 장치이다. 일반적으로 스펙트럼의 위상정보는 인지 청각적 관점에서 중요하지 않은 것으로 알려져 있다. 따라서 잡음 부가

된 신호의 스펙트럼의 크기만 잡음신호의 스펙트럼 크기에 따라 억제된다.

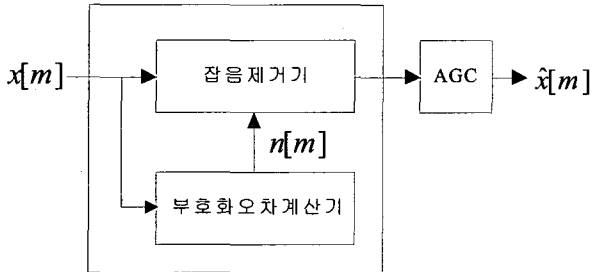


그림. 1. 제안하는 전처리 방법.

Fig. 1. Proposed preprocessing method.

이와 비슷한 접근방법이 음악 입력신호에 적용될 수 있다. 본 논문은 모든 음악 입력신호를 그것이 실제 잡음에 의해 왜곡되었느냐 여부에 상관없이 잡음 부가된 신호로 간주한다. 즉 깨끗한 음악신호라 하더라도 ‘감추어진 잡음’에 의해 왜곡된 잡음 부가된 신호로 간주하기로 한다. 여기서 ‘감추어진 잡음’이란 가상의 잡음을 의미하며, 만약 이것이 부호화되기 전에 제거될 경우 부호화기는 최적의 음질을 출력하게끔 되며 그렇지 않을 경우 부호화기가 잘 처리하지 못하고 잡음형태로 출력하게 되는 그런 신호를 의미한다. 본 논문에서는 이러한 의미의 ‘감추어진 잡음’을 원래의 입력 음악 신호에 대한 부호화 오차신호로 근사하기로 한다. 이와 같은 가정에 하에 입력 음악 신호는 (1)의 잡음 부가된 신호  $x[m]$ 에 부호화 오차신호는 (1)의 잡음 신호  $n[m]$ 에 대응하게 되며, 부호화 오차신호  $n[m]$ 가 주어질 경우 기존의 잡음억제 방식을 따라 입력 음악 신호로부터 부호화 오차 신호가 제거되게 된다. 한편, 여기서 억제된 잡음신호 즉, 부호화 오차신호는 실제의 잡음신호가 아니라 가상의 신호 이므로 잡음 억제된 입력 음악 신호 레벨을 원래 입력 신호 레벨과 같게 유지시키는 것이 필요하다. 그림 1의 AGC는 이와 같은 목적으로 사용된다. 이 AGC 처리에 의해 앞서 NS에 의해 원래 입력 신호로부터 빠져나간 부호화 오차신호의 에너지는 전체적으로 주파수 스펙트럼 상에 고루 재분배된다. 결론적으로, 이와 같은 NS와 AGC의 결합에 의한 본 전 처리 방법은 높은 신호 대 양자

화 잡음 비(signal-to-quantization noise ratio, SQNR)를 가지는 입력신호의 주파수 성분은 상대적으로 강조하며 그렇지 못한 주파수 성분은 억제시키는 동작을 한다. 여기서 각각의 주파수성분에 대한 SQNR은 다음과 같이 정의된다 :

$$SQNR[l, k] = \frac{|X[l, k]|}{|N[l, k]|} \quad (2)$$

여기서  $l$ 과  $k$ 는 각각 프레임 인덱스와 주파수 성분을 가리킨다. 또한  $|X[l, k]|$ 와  $|N[l, k]|$ 은 각각 입력 음악 신호  $x[m]$ 과 그것의 부호화 오차신호  $n[m]$ 의 주파수 스펙트럼 크기를 나타낸다. 이러한 새로운 전 처리 방법은 기존의 음성 부호화기의 후처리기와 비교될 수 있을 것이다. 즉, 기존의 후처리기는 LP 모델에 근거하여 포먼트 부분들을 강조하며 그 외의 골짜기 부분들을 억제함으로써 부호화과정에서 생긴 부호화 오차신호를 청각적으로 인지하지 못하도록 차폐시키는 동작을 수행한다. 이와는 대조적으로 본 방법은 전 처리 단 처리가 이루어지며 부호화 오차신호를 직접 계산하여 사전에 억제시키는 동작을 수행한다.

본 방법은 부호화 오차신호  $n[m]$  얻기 위해 사전에 추가적인 부호화처리를 필요로 한다. 이는 본 방법의 실시간 적용을 어렵게 하는 요인이 될 수 있다. 오프라인 응용의 한 형태로서, 오디오 신호는 한 프레임씩 제시된 방법으로 전 처리된 후 이동통신망내의 지정된 데이터베이스에 저장되었다가 필요할 때 이동통신망을 통하여 전송될 수 있을 것이다.

### III. 구현상의 몇 가지 세부사항

본 논문의 전 처리 방법을 적용하여 평가하기 위한 부호화기로서 현재 CDMA (Code Division Multiple Access) 이동통신망의 주요 부호화기인 EVRC를 선정하였다<sup>[3]</sup>.

사용된 NS 알고리즘은 필터이득 계산법을 제외하고는

EVRC의 전처치 단에서 사용되고 있는 NS 알고리즘을 기본 골격으로 구현되었다. 필터이득은 단순히 주파수크기 차감법(spectral magnitude subtraction method)에 따라 계산되었다<sup>[4]</sup>. 입력 음악신호와 부호화 오차신호의 스펙트럼 크기는 매 프레임마다 다음 식에 의해 갱신 된다:

$$|X[l, k]| = 0.45 |X[l-1, k]| + 0.55 |X[l, k]| \quad (3)$$

$$|N[l, k]| = 0.9 |N[l-1, k]| + 0.1 |N[l, k]| \quad (4)$$

부호화 오차신호의 스펙트럼 크기는 긴 시간을 통해 서서히 갱신되는데 이를 통하여 정상적(stationary)이고 백색 잡음형태의 부호화 오차신호를 잡아내게 된다. NS를 위한 프레임 크기는 10 ms, 80 샘플로 구성된다. 따라서 EVRC 한 프레임, 20ms 마다 2번의 NS 동작이 실행된다. NS 입력신호들은 128-포인트 FFT를 통하여 주파수 성분으로 변환되며, 주파수영역에서 NS 필터처리를 거친 뒤 다시 시간영역 신호로 변환처리 된다.

부호화 오차신호로는 일반적으로 정의되는 신호 즉, 원래신호와 합성신호와의 차 대신 FCB (Fixed Codebook) 잔차 신호 즉, FCB 목표신호와 탐색된 FCB 벡터 사이의 차를 사용하였다. 이는 EVRC 부호화기의 독특한 특징 즉, 부호화 과정에서 입력신호의 LPC 잔차 신호를 피치등고선(pitch contour)을 따라 5ms 범위 내에서 재 정렬함으로써 생기는 원음 왜곡의 효과를 부호화오차 계산에서 배제시키기 위함이다. FCB 목표신호는 피치성분이 배제된 신호로, 따라서 이로부터 계산된 FCB 잔차 신호를 부호화 오차신호로 사용할 경우 이러한 왜곡효과가 부호화 오차신호에 반영되지 않게 된다. 실험결과에 의하면 FCB 잔차 신호를 부호화 오차신호로 사용하는 것이 더 좋은 결과를 가져올 수 있었다.

제안된 전 처리방법에 의한 NS 동작을 수행함에 있어 계산된 부호화 오차신호를 그대로 적용할 경우 과도한 잡음억제에 의한 심한 음질 왜곡이 발생됨이 관찰되었다. 이 경우 최종적으로 부호화과정을 거쳐 출력된 음은 거친 부호화 잡음이 사라지긴 하지만 둔탁하게 들리는 소리

(muffled sound)를 만들어 낸다. 본 논문은 이러한 현상을 완화시키기 위해 계산된 부호와 오차신호에 0.5 이득을 곱하여 레벨을 3dB 떨어뜨린 뒤 NS 동작에 적용하였다.

필터이득  $G$ 는 스펙트럼 상의 갑작스런 변화를 방지하기 위해 매 프레임마다 다음 식에 의해 매끄러운 처리를 거친 뒤 사용되었다:

$$G[l, k] = \alpha G[l-1, k] + (1-\alpha)G[l, k] \quad (5)$$

여기서  $\alpha$  값은 실험적으로 0.45로 결정되었다. 에너지 등고선을 결정짓는 AGC 이득  $g$  또한 갑작스런 변화를 방지하기 다음 식에 따라 갱신 된다:

$$g[l] = 0.2 g[l-1] + 0.8 g[l] \quad (6)$$

#### IV. 성능평가

본 논문에서 제안된 방법은 원래 신호에 대한 변형을 기본 전제로 하고 있으므로 성능평가에 있어서 SNR 형태의 객관적인 측도들은 적합하지 않다. 따라서 주관적인 선호도 조사가 수행되었다. C, K1, K2, E1, E2로 명명된 5개의 테스트 벡터가 인기 음악 연결음 목록으로부터 선택되었다. 여기서 C는 클래식 음악, K1과 K2는 2개의 한국 가요, E1과 E2는 각각 영어 가사의 팝송을 나타낸다. 각각의 음악은 오리지널 사운드트랙에서 추출된 30초 내외의 모노, 16bit/8kHz PCM 신호들이다. 선택된 두 영어 가사의 팝송은 다음과 같다:

E1: Toxic Britney Spears.

E2: U can't tough this MC Hammer.

즉 E1은 복잡한 전자음악이며 반면, E2는 상대적으로 음성이 강한 랩 음악이다. K1과 K2도 각각 이와 비슷한 특징을 가진다. C는 "비탈디의 사계" 중의 한 부분으로 바이올린 연주음으로 이루어진 구간이다. 각각의 벡터들로부터

두 버전 음 A와 B가 만들어 졌는데 버전 A는 제안한 방법에 의해 전 처리를 거친 뒤 부호화과정을 거친 소리이고 버전 B는 전 처리 없이 부호화 과정만 거친 것이다.

평가는 외부잡음으로부터 차단된 실험실에서 진행되었다. 각각의 평가 버전들은 PC상에서 Sennheizer HD 414 헤드폰을 사용하여 재생되었으며 출력 볼륨은 실험관리자에 의해 특정 레벨에 고정되었다. 입력벡터들의 PCM 레벨은 최대 크기의 구형파 기준으로 -17dB 와 -20dB 사이에 분포하고 있다.

20대에서 30대의 총 100명(남자 88명 여자 12명)의 청취자가 실험에 참가하였다. 이들은 모두 이메일로 모집된 삼성전자 직원들로 본 작업과 직접적인 관련이 없는 사람들이다. 이들은 다시 20명씩 소그룹으로 나뉘어졌으며 각각의 소그룹은 5개의 테스트 벡터중 하나의 테스트벡터를 평가하도록 하였다. 각각의 소그룹의 참가자들은 그들에게 할당된 테스트 벡터의 두 버전을 무작위의 순서로 들었으며, 세 번 반복하여 청취한 뒤 선호도에 대한 답변을 작성하였다.

표 1. 청취평가결과  
Table 1. Listening Test Result

테스트벡터	버전 A	버전B	같다	전체
C	6	3	11	20
K1	13	2	5	20
K2	10	2	8	20
E1	13	3	4	20
E2	7	4	9	20
전체	49	14	37	100

표 1은 전체적인 결과를 나타낸다. 전체적으로 86%의 참가자들이 제안한 방법이 우수하거나 동등하다고 평가하였다. 특히, 복잡한 음악 K1과 E1에 대해서는 대부분의 참가자들이 제안된 방법을 선호하였다. 버전 A에 대한 일반적인 소감은 "더 부드럽다", "더 명료하다", "편안하다" 혹은 "안정감이 느껴진다" 등이었다. 반면, 버전 B에 대한 평은 "조금 더 깨끗한 것 같다", "잡음이 강하다", "거칠다" 등이었다. 한편, 단순한 음악 K2 과 E2에 대한 개선은 상대적으로

로 미미하다.

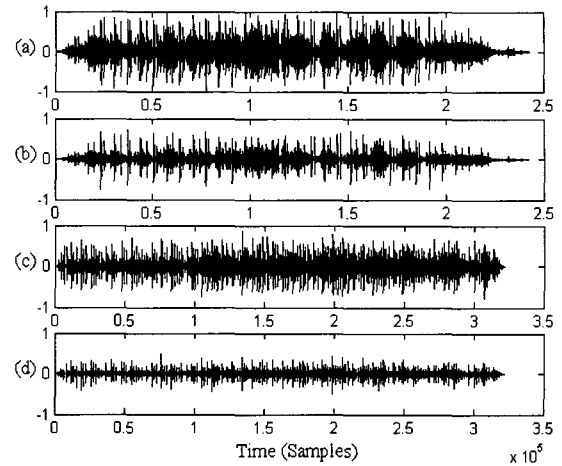


그림 2. 파형들: (a) E1 원래파형 (b) E1의 부호화오차 (c) E2 원래파형 (d) E2부호화오차.  
Fig. 2. Waveforms: (a) Original waveform of E1; (b) Coding residual of E1; (c) Original waveform of E2; (d) Coding residual of E2.

이에 대한 정량적인 설명이 그림 2에 나타나 있다. 여기에 제시된 신호들은 E1과 E2의 원래 파형 그리고 그들 각각의 부호화 오차신호들이다. 그림 2에서 보여진 바와 같이 E1의 잔차 신호 레벨이 E2보다 크다. 이를 신호 전체에 대한 SQNR 값으로 살펴보면 E1에 대해서는 5.77dB이고 E2에 대해서는 9.01dB이다. 이것은 복잡한 신호 E1을 부호화 하는 것이 단순한 신호 E2를 부호화 하는 것 보다 더 어렵다는 것을 의미하며, E1의 부호화 과정에서 더 큰 음질 저하가 발생하게 됨을 의미한다. 제안된 전 처리 방법을 적용한 뒤 각각의 SQNR은 E1은 5.77dB에서 7.63dB로, E2는 9.01dB에서 11.55dB로 개선되었다. 객관적으로는 E2에 대한 개선이 더 커 보인다. 그러나 주관적으로 청취자들이 느끼기에는 E1에 대한 개선이 훨씬 더 큰 것으로 나타났다. 이는 E2의 음질은 전 처리를 하지 않더라도 그리 나쁘지 않은 데서 연유하는 것으로 보인다. 제안된 방법을 또한 순수 음성신호에도 적용하여 보았는데 주관적인 평가와 객관적인 평가 즉, PESQ MOS값에 있어서 어떤 뚜렷한 차이점도 발견할 수 없었다<sup>[7]</sup>. 정상레벨의 깨끗한 음성남녀 각각 10개씩의 테스트 벡터에 대한 PESQ MOS값 측정결과 제

안한 전 처리 방법을 적용할 경우 평균 3.73, 그렇지 않은 경우 3.71의 결과를 얻었다. 이를 통하여 제안된 방법이 일반적인 음성신호에 대해서 해가 되지 않음을 알 수 있었다.

### V. 결 론

본 논문에서는 기존 NS 방법에 기초한 음성부호화기에서의 음질개선을 위한 전 처리 방법을 제안하였다. 제안된 전 처리기는 입력신호가 보다 효율적으로 부호화되도록 NS와 AGC 동작을 통하여 입력 음악신호의 주파수 스펙트럼 분포를 재배치한다. 이 방법의 하나의 단점은 부호화 오차를 계산하기 위해 사전에 추가적인 부호화 동작이 필요하다는 것이다. 반면, 이 방법은 일반적인 구조를 가지고 있으며 따라서 기존의 여러 음성 부호화기에 쉽게 적용될 수 있다는 장점을 가진다. 주관적인 선호도 조사결과 제안된 방법이 복잡한 음악신호로 기인한 성가신 잡음을 사전에 억제해 주며 결과적으로 음질개선을 가져다준다는 것을 확인할 수 있었다.

### 참 고 문 헌

- [1] R. Hagen, W. B. Kleijn and E. Ekudden, "Relaxing model-imposed constraints based on decoder analysis," *Speech Coding for Telecommunications Proceeding, 1997, 1997 IEEE Workshop on*, pp. 59-60, Sept. 1997.
- [2] Y. H. Nam and et al., "A preprocessing approach to improving the quality of the music decoded by an EVRC codec," *IEICE Trans. Commun.*, Vol. E86-B, No. 10, pp. 3123-3125, Oct. 2003.
- [3] TIA/EIA/IS-127 Enhanced Variable Rate Codec, Service Option 3 for Wideband Spread Spectrum Digital Systems.
- [4] S. F. Boll, "Suppression of Acoustic Noise in Speech Using Spectral Subtraction," *IEEE Trans. Acous., Speech, Signal Processing*, Vol. ASSP-27, No. 2, pp. 113-120, Apr. 1979.
- [5] Y. Ephraim and D. Malah, "Speech Enhancement Using a Minimum Mean-Square Error Short-time Spectral Amplitude Estimator," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, Vol. ASSP-32, No. 6, pp. 1109-1221, Dec. 1984.
- [6] M. S. Ahmed, "Speech Enhancement by adaptive MMSE filtering," *Tech. Rep. Compt. Sci. Dep., Carnegie-Mellon Univ., Pittsburgh, PA*, 1986.
- [7] ITU-T Recommendation P.862, Perceptual evaluation of speech quality (PESQ): An objective method for end-to-end speech quality assessment of narrow-band telephone networks and speech codecs, International Telecommunication Union, 200

### 저 자 소 개



#### 송 근 배

- 1992년 2월 : 아주대학교 전자공학 (학사)
- 1995년 2월 : 아주대학교 전자공학 (석사)
- 2001년 8월 : 아주대학교 전자공학 (박사)
- 1995년 1월~1996년 3월 : 현대전자 S/W 연구소 연구원
- 2001년 8월~현재 : 삼성전자 책임연구원
- 주관심분야 : 음성/오디오 신호처리, 패턴인식, 기계학습



#### 안 철 용

- 1993년 2월 : 서울대학교 전자공학과 (학사)
- 1995년 2월 : 서울대학교 전자공학과 (석사)
- 1995년 3월~2000년 2월 : 서울대학교 전기공학부 박사과정
- 2000년 3월~ : 삼성전자연구원
- 주관심분야 : 음성/오디오 신호처리, 멀티미디어 시스템

---

 저 자 소 개
 

---

**김재범**

- 서울대학교 전자공학과 (학사)
- 서울대학교 전자공학과 (석사)
- 서울대학교 전자공학과 (박사)
- 삼성전자 책임연구원
- 주관심분야 : 음성신호처리, DSP, 멀티미디어

**박호종**

- 1986년 2월 : 서울대학교 전자공학과 (학사)
- 1987년 12월 : University of Wisconsin-Madison, 전기/컴퓨터공학과(석사)
- 1993년 5월 : University of Wisconsin-Madison, 전기/컴퓨터공학과(박사)
- 1993년 9월~1997년 8월 : 삼성전자 선임연구원
- 1997년 9월~현재 : 광운대학교 전자공학과 교수
- 주관심분야 : 음성/오디오 신호처리, 멀티미디어 시스템

**김석호**

- 1986년 5월 : University of Illinois-Urbana-Champaign, 전자공학 (학사)
- 1988년 5월 : University of Illinois-Urbana-Champaign, 전자공학 (석사)
- 2001년 12월 : Illinois Institute of Technology, 컴퓨터공학 (박사)
- 1988년 7월~2002년 12월 : Lucent Technologies, Bell Labs 근무
- 2003년 2월~현재 : 삼성전자 통신연구소 상무
- 주관심분야 : 신호처리, 멀티미디어, 시스템 simulation, ASIC/FPGA 개발, RF 분석