

# Tracking Echo-Presence Uncertainty 기반의 잔여 반향 억제

정회원 박 윤 식\*, 종신회원 장 준 혁\*\*

## Residual Echo Suppression Based on Tracking Echo-Presence Uncertainty

Yun-Sik Park\* *Regular Member*, Joon-Hyuk Chang\*\* *Lifelong Member*

### 요 약

본 논문에서는 주파수영역에서 음향학적 반향 억제 (AES, acoustic echo suppression) 성능을 개선시키기 위해 tracking echo-presence uncertainty (TEPU) 기법에 근거한 새로운 잔여 반향 억제 (RES, residual echo suppression) 알고리즘을 제안한다. 제안된 방법은 RES를 위해 마이크로폰 입력신호 대 원단의 반향신호가 제거된 결과신호의 전력 비 (ratio)를 문턱 (threshold) 값에 의한 decision rule에 적용하여 추정된 echo-presence uncertainty를 RES 필터로 이용한다. 제안된 알고리즘은 각각의 주파수 채널에서 echo-presence uncertainty를 도출하여 용이하게 잔여 반향신호를 제거하는 장점을 가진다. 실제로 잔여 반향신호를 제거하기 위한 기존의 방법과 객관적인 실험을 통해 비교 평가한 결과 우수한 성능을 보였다.

**Key Words** : Acoustic Echo Suppression, Residual Echo Suppression

### ABSTRACT

In this paper, we propose a novel approach to residual echo suppression (RES) algorithm based on tracking echo-presence uncertainty (TEPU) to improve the performance of acoustic echo suppression (AES) in the frequency domain. In the proposed method, the ratio of the microphone input and the echo-suppressed output signal power is employed as the threshold value for the decision rule to estimate the echo-presence uncertainty applied to the RES filter. The proposed RES scheme estimates the echo presence uncertainty in each frequency bin and effectively reduces residual echo signal in a simple fashion. The performance of the proposed algorithm is evaluated by the objective test and yields better results compared with the conventional schemes.

### I. 서 론

일반적으로 핸드프리 (hand-free) 통신이나 PC 메신저 (messenger) 시스템에서는 통화음질을 저해하는 음향학적 반향 (acoustic echo)이 발생할 수 있다<sup>[1]-[3]</sup>. 이러한 음향학적 반향은 음향학적 반향

억제 (AES, acoustic echo suppression) 알고리즘을 사용함으로써 제거될 수 있는데 실제 반향 경로와 반향 경로 추정 필터 (filter)에 의해 추정된 반향 경로의 차이 및 실제적인 통신 환경에서 발생할 수 있는 다양한 요소로 인해 반향신호 제거 후에도 여전히 잔여 반향 (residual echo) 신호가 존재하게 된

※ 이 논문은 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2009-0072319) 또한 본 연구는 지식경제부와 한국산업기술재단의 전략기술인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

\* 인하대학교 전자공학과 DSP연구실(yspark@dsp.inha.ac.kr) \*\* 인하대학교 전자공학과(changjh@inha.ac.kr)

논문번호 : KICS2009-06-263, 접수일자 : 2009년 6월 27일, 최종논문접수일자 : 2009년 10월 8일

다<sup>[4]</sup>. 따라서 잔여 반향신호를 제거하기 위해 Wiener 필터나<sup>[3]</sup> MMSE (minimum mean square error) 기반의 잔여 반향 억제 필터를 추가적으로 이용하는 잔여 반향 억제 (RES, residual echo suppression) 알고리즘이 널리 사용되어 왔으며<sup>[5]</sup> 최근에는 음성의 통계적 모델에 기반한 soft decision 방법을 AES의 이득에 적용하여 잔여 반향신호를 제거하는 이득 수정 (gain modification) 기법이 제시되었다<sup>[6]</sup>.

본 논문에서는 AES의 성능 개선을 위해 tracking echo-presence uncertainty (TEPU) 기법을 도입하여 간단하면서도 효과적으로 잔여 반향신호를 제거하는 새로운 RES 알고리즘을 제안한다. 제안된 방법은 RES를 위해 마이크로폰 입력신호 대 원단 (far-end)의 반향신호가 제거된 결과신호의 전력 비 (ratio)를 문턱 (threshold) 값에 의한 decision rule에 적용하여 추정된 echo-presence uncertainty를 RES 필터로 이용 한다<sup>[7]</sup>. 제안된 방법의 객관적인 성능 비교를 위해 ERLE (echo return loss enhancement)와 SA (speech attenuation) 테스트를 실시하였으며 제안된 기법은 기존의 방법보다 우수한 성능을 보였다.

II. Soft Decision 기반의 Gain Modification

주파수 영역에서의 RES 알고리즘이 적용된 AES 시스템 블록도는 그림 1과 같다. 음향학적 반향 억제기에서 반향신호  $d(t)$ , 배경잡음  $w(t)$ , 근단 (near-end) 화자 신호  $s(t)$ , 원단 신호와 마이크 입력신호를 각각  $x(t)$ ,  $y(t)$ 라 한다며 음성의 통계 모델에 기반한 soft decision 추정을 위해 근단화자신호가 존재하지 않을 때와 존재할 경우 각각의 가정  $H_0$ ,  $H_1$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 H_0: & \text{near-end speech absent: } Y(i,k) = D(i,k) \quad (1) \\
 H_1: & \text{near-end speech present} \\
 & : Y(i,k) = D(i,k) + S(i,k)
 \end{aligned}$$

여기서  $Y(i,k)$ 는 주파수 영역에서  $y(t)$ 의  $i$ 번째 프레임의  $k$ 번째 주파수 성분으로 나타내며 통계적 모델을 위해 근단화자신호와 배경잡음은 상관관계가 없고 반향신호  $D(i,k)$ 는 근단화자신호인  $S(i,k)$ 와 통계적으로 독립이라 가정한다. 원단신호와 근단화자신호가 complex Gaussian 분포를 따른다는 가정에서  $H_0$ 와  $H_1$ 의 확률밀도함수는 다음과 같다<sup>[8]</sup>.

$$p(Y(i,k)|H_0) = \frac{1}{\pi\lambda_d(i,k)} \exp\left[-\frac{|Y(i,k)|^2}{\lambda_d(i,k)}\right] \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
 p(Y(i,k)|H_1) = & \frac{1}{\pi(\lambda_s(i,k) + \lambda_d(i,k))} \\
 & \exp\left[-\frac{|Y(i,k)|^2}{\lambda_s(i,k) + \lambda_d(i,k)}\right] \quad (3)
 \end{aligned}$$

여기서  $\lambda_s(i,k)$ ,  $\lambda_d(i,k)$ 는 각각 근단화자신호와 추정된 반향신호의 전력을 나타내며 Bayes' rule에 의하여 각 주파수 채널별 near-end speech absence probability를 구하면 아래와 같이 표현 된다<sup>[8]</sup>.

$$\begin{aligned}
 p(H_0|Y(i,k)) = & \frac{p(Y(i,k)|H_0)p(H_0)}{p(Y(i,k)|H_0)p(H_0) + p(Y(i,k)|H_1)p(H_1)} \\
 = & \frac{1}{1 + qA(Y(i,k))} \quad (4)
 \end{aligned}$$

여기서  $q = p(H_1)/p(H_0)$ 이고 soft decision의 성능 향상을 위해 근단화자신호의 부재에 대한 가변 선행 확률 (*a priori probability*)을  $q$ 에 적용 한다<sup>[5],[6]</sup>. 위의 (2)식과 (3)식을 (4)식에 대입하면 likelihood ratio  $A(Y(i,k))$ 는 다음과 같다<sup>[9]</sup>.

$$A(Y(i,k)) = \frac{p(Y(i,k)|H_1)}{p(Y(i,k)|H_0)} = \frac{1}{1 + \xi(i,k)} \exp\left[\frac{\gamma(i,k)\xi(i,k)}{1 + \xi(i,k)}\right] \quad (5)$$

여기서, 파라미터로  $\gamma(i,k)$ ,  $\xi(i,k)$ 는 각각 *a poste-*

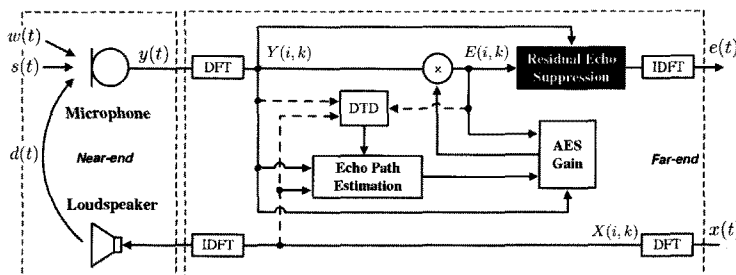


그림 1. 음향학적 반향 억제기의 블록도

riori SER (signal to echo ratio)과 a priori SER로 아래와 같이 정의 된다<sup>6)</sup>.

$$\gamma(i, k) = \frac{|Y(i, k)|^2}{\lambda_d(i, k)} \quad (6)$$

$$\xi(i, k) = \frac{\lambda_s(i, k)}{\lambda_d(i, k)} \quad (7)$$

또한 (7)식에서  $\xi(i, k)$ 을 추정하기 위해 다음과 같이 Decision-Directed 추정 방법을 적용 한다<sup>10)</sup>.

$$\hat{\xi}(i, k) = \alpha_{DD} \frac{|\hat{S}(i-1, k)|^2}{\lambda_d(i-1, k)} + (1 - \alpha_{DD}) P[\gamma(i, k) - 1] \quad (8)$$

(8)식에서  $\alpha_{DD} (0 \leq \alpha_{DD} < 1)$ 는 가중치 파라미터,  $P[x]$ 는  $P[x] = x$  if  $x \geq 0$  이고,  $P[x] = 0$  if  $x < 0$ 을 의미하는 연산자이며 반향신호의 전력 스펙트럼 추정치  $\hat{\lambda}_d(i, k) = E[|\hat{Y}(i, k)|^2]$  이다.  $E[\cdot]$ 는 기대 값 연산자이며 다양한 반사 경로를 거쳐 마이크로폰으로 전달되는 원단신호의 주파수 성분  $X(i, k)$ 로부터 반사 경로를 고려한 임펄스응답에 대한 추정된 반향신호  $|\hat{Y}(i, k)|$ 는 least squares 추정 방법에 기반하여 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>11)</sup>.

$$|\hat{Y}(i, k)| = \left| \frac{E[X^*(i, k)Y(i, k)]}{E[X^*(i, k)X(i, k)]} \right| |X(i, k)| \quad (9)$$

여기서 \*는 complex conjugate를 의미한다. 최종적으로, soft decision 기반의 gain modification이 적용된 AES의 이득은 near-end speech presence probability  $p(H_1|Y(i, k)) (= 1 - p(H_0|Y(i, k)))$ 을 결합하여 다음과 같이 나타 낼 수 있다<sup>6)</sup>.

$$E(i, k) = (p(H_1|Y(i, k))G_{MMSE}(i, k))Y(i, k) \quad (10)$$

여기서  $E(i, k)$ 는 입력신호로부터 반향신호가 제거된 결과신호의 주파수 성분이며  $G_{MMSE}(i, k)$ 는 MMSE 추정 기반의 반향 억제 이득을 의미 한다<sup>10)</sup>.

### III. 제안된 Tracking Echo Presence Uncertainty 기반의 잔여 반향 억제

2장에서는 주파수영역에서 효과적인 AES를 위하여 RES에서 향상된 성능을 보이는 soft decision 기반의 gain modification 방법에 대하여 살펴보았다. 일반적으로 이러한 gain modification 기법이나 추가적으로 Wiener 필터나 MMSE 추정 기반의 제

거 이득을 사용하는 RES 알고리즘에서는<sup>5)</sup> 주요 파라미터로서 a posteriori SER과 a priori SER이 사용된다. 따라서 파라미터의 추정에 의한 계산량이 증가하고 특히, a priori SER  $\xi(i, k)$ 의 추정을 위해 간단하면서도 musical 잡음 제거에 우수한 성능을 보인다고 알려진 (8)식의 Decision-Directed이 주로 사용되는데 이는 음성이 급격히 변화하는 전이 구간에서 프레임 지연에 의한 음성 왜곡을 일으키는 단점이 있다<sup>12)</sup>. 따라서 본 논문에서는 AES의 성능 개선을 위해 tracking echo-presence uncertainty (TEPU) 기법을 도입하여 간단하면서도 효과적으로 잔여 반향신호를 제거하는 새로운 RES 알고리즘을 제안한다. 제안된 방법은 RES를 위해 마이크로폰 입력신호  $Y(i, k)$ 와 원단의 반향신호가 제거된 결과신호  $E(i, k)$ 의 전력 비를 문턱 값에 의한 decision rule에 적용하여<sup>7)</sup> 추정된 echo-presence uncertainty를 RES 필터에 적용한다. TEPU를 위하여 반향신호가 존재하지 않을 때와 존재할 경우 각각의 가정  $E_0$ ,  $E_1$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} E_0: \text{far-end echo absent: } Y(i, k) &= W(i, k) + S(i, k) \\ E_1: \text{far-end echo present} \\ &: Y(i, k) = W(i, k) + S(i, k) + D(i, k) \end{aligned} \quad (11)$$

(11)식에서의 반향신호  $D(i, k)$ 에 대한 존재유무는 다음과 같은 문턱 값  $T$ 에 의한 decision rule에 의해 간단하게 결정될 수 있다<sup>7)</sup>.

$$R(i, k) \begin{cases} < T \\ > T \end{cases} \begin{matrix} E_0 \\ E_1 \end{matrix} \quad (12)$$

여기서,  $R(i, k)$ 는 마이크로폰 입력신호와 반향신호가 제거된 결과신호의 전력비로서 다음과 같다.

$$R(i, k) = \frac{|Y_s(i, k)|^2}{|E_s(i, k)|^2} \quad (13)$$

$$|Y_s(i, k)|^2 = \zeta_y |Y_s(i-1, k)|^2 + (1 - \zeta_y) |Y(i, k)|^2 \quad (14)$$

$$|E_s(i, k)|^2 = \zeta_E |E_s(i-1, k)|^2 + (1 - \zeta_E) |E(i, k)|^2 \quad (15)$$

여기서  $\zeta_y$ ,  $\zeta_E$ 는 smoothing 파라미터이다. 최종적으로 echo-presence uncertainty를 적용한 RES 필터  $G_E(i, k)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_E(i, k) = \alpha_E G_E(i-1, k) + (1 - \alpha_E) \Gamma_k(i, k) \quad (16)$$

여기서  $\alpha_E$ 은 smoothing 파라미터이고  $\Gamma_k(i, k)$ 는

(12)식의 결정에 의해  $E_0$  이면  $\Gamma_k(i, k) = 1$ ,  $E_1$  이면  $\Gamma_k(i, k) = 0$ 을 갖는 index 함수이다. 구체적으로 본 논문에서 제안된 기법은 기존에 잡음 제거 (noise suppression)와 AES를 위한 gain modification에서 잡음에 대한 음성신호<sup>[7]</sup> 그리고 반향신호에 대한 근단화자신호의 *a priori probability*를 추정하기 위해 각각 적용되어 왔으나<sup>[6]</sup> 잡음, 원단의 반향신호, 동시통화 및 근단화자신호 구간이 존재하는 AES 통계 모델에서는 RES를 위한 필터로 이용하기에 부적합하였다. 하지만 제안된 방법은 (13)식의 입력신호 대 결과신호의 전력비  $R(i, k)$ 가 반향신호가 제거된 구간에서만 상대적으로 문턱 값  $T$ 보다 큰 값을 가지게 되고 (12)식의 decision rule과 (16)식의 index 함수  $\Gamma_k(i, k)$ 에 의하여 결국 원단 반향신호만이 존재하는 구간에서 0에 가까운 값을 가지고 그 외 구간에서는 1에 가까운 값을 가지게 되는 RES 필터  $G_E(i, k)$ 를 도출하게 된다. 따라서 제안된 RES 알고리즘은 입력신호와 결과신호의 간단한 비를 통하여 (11)식의 통계모델에 적용하기 용이하며 또한 간단하게 적용된 알고리즘에 의한  $G_E(i, k)$ 를 통하여 잔여 반향 신호를 효과적으로 제거할 수 있는 이점을 가진다. 최종 결과신호의 주파수 성분  $\hat{E}(i, k)$ 는 RES 필터가 적용된 형태로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{E}(i, k) = E(i, k)G_E(i, k) \quad (17)$$

여기서 RES 필터를 거치기 전의 결과신호  $E(i, k)$ 는 (10)식과 같이 MMSE 추정 기반의 AES 이득에 의해 도출된다.

$$E(i, k) = G_{\text{MMSE}}(i, k)Y(i, k) \quad (18)$$

그리고 기존 및 제안된 반향 억제 알고리즘에서는 동시통화 (double-talk) 구간에서의 반향 경로 추정 이득의 갱신에 의한 오차를 줄이기 위해 교차상관 (cross-correlation) 계수에 기반한 동시통화 검출기 (DTD, double-talk detector)를 주파수 영역에서 적용하였다<sup>[11]</sup>.

#### IV. 실험 결과

본 논문에서는 제안된 알고리즘의 성능 평가를 위해 다양한 잡음 환경에서 객관적인 실험을 수행하였다. 성능 평가는 근단화자신호가 없을 때 원단신호 구간에서 반향 억제 후 여전히 남아 있는 잔

여 반향의 제거 정도를 측정하는 ERLE (echo return loss enhancement)와 동시통화 구간에서의 음성의 보존도를 평가하는 SA (speech attenuation) 테스트를 실시하였다. 음향학적 반향신호의 감쇠 정도와 음성 보존도를 측정하기 위한  $ERLE(t)$ 와  $SA$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>[4]</sup>.

$$ERLE(t) = 10 \log_{10} \left[ \frac{E\{y^2(t)\}}{E\{e^2(t)\}} \right] \quad (19)$$

$$SA = \frac{1}{N} \sum_{N} 10 \log_{10} \left[ \frac{E\{s^2(t)\}}{E\{\hat{s}^2(t)\}} \right] \quad (20)$$

식 (20)에서  $N$ 은 동시통화 구간의 샘플수이고  $\hat{s}(t)$ 는 출력신호의  $e(t)$ 에서의 근단화자신호 성분을 의미한다.

테스트 샘플을 위해 7명의 화자로 부터 얻은 8kHz로 샘플링 된 20개의 문장을 수집하고 각 문장을 원단화자와 근단화자신호로 분류하여 합성하였다. 원단화자신호로 분류된 음성은 섞기 전에 반사 경로를 고려한 실제 환경을 모델링하기 위해 임펄스 응답 필터를 통과 시키고 입력 마이크로폰으로 들어가는 반향신호는 근단화자신호 보다 3.5 dB 작게 하였다<sup>[4],[13],[14]</sup>. 모델링 환경의 장소는  $5 \times 4 \times 3 \text{ m}^3$  크기로 설정 하였고 잡음 환경을 위해서 white, babble과 vehicular 잡음을 다양한 SNR (signal-to-noise ratio)로 부가하였다. 그리고 제안된 알고리즘에 적용된 파라미터와 문턱 값은 성능 평가에 사용된 테스트 샘플에 기반하여  $\alpha_{DD} = 0.6$ ,  $\zeta_Y = 0.9$ ,  $\zeta_E = 0.9$ ,  $\alpha_E = 0.3$ ,  $T = 1.0$ 로 설정하였다. 그림 2는 주파수 영역에서 반향억제에 우수한 성능을 보인다는 Wiener 필터 및 이보다 향상된 soft decision 기반의 gain

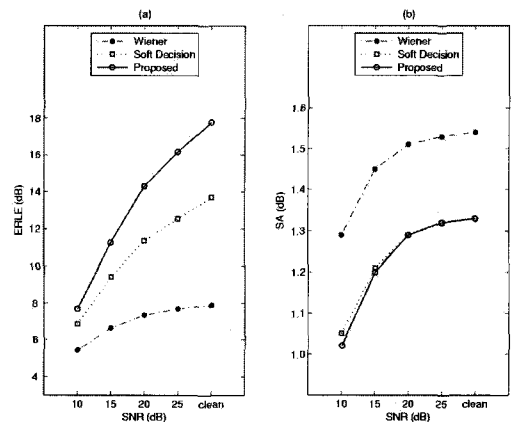


그림 2. AES 알고리즘의 성능 비교: (a) ERLE 비교 (b) 음성 보존도 (SA) 비교

modification을 적용한 AES 알고리즘과 제안된 방법에 대한 다양한 잡음환경에서의 ERLE와 SA의 평균 수치를 비교한 것이다. 기존의 반향 억제 이득에 대한 연구 결과와 기법들<sup>[6]</sup> 기반으로 그림 2의 (a)에서 제안된 RES 알고리즘은 다양한 SNR 환경에서 기존의 기법보다 향상된 ERLE 수치 및 전체적으로 Wiener 필터 기반의 기법보다 평균 7 dB, gain modification 방법보다는 대략 3 dB의 향상된 ERLE를 보이고 있으며 그림 (b)로 부터 제안된 알고리즘이 Wiener 필터 기반의 기법보다는 전체 평균 0.2 dB의 향상된 음성보존도 및 gain modification 방법과는 거의 일치하는 음성 보존도를 유지하는 것을 볼 수 있다.

그림 3은 배경 잡음으로서 babble 잡음이 SNR=20 dB로 부가되고 원단신호가 섞여 있는 입력신호에 대하여 제시된 알고리즘 의한 시간에 따른 ERLE 변화를 보여주고 있다. 그림 3으로부터 제안된 기법이 기존의 방법보다 반향신호를 제거함에 있어서 향상된 ERLE 변화를 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 그림 4는 제시된 알고리즘에 의해서 도출된 최종 음성파형들을 보여 주고 있다. 그림 4로부터 제안된 RES 방법에 의한 음성파형에서는 기존의 방법에 의해 원단 반향신호구간에서의 인지가 가능한 정도의 잔여 반향신호가 효과적으로 제거됨으로서 테스트 샘플의 음질에서도 향상을 가져오는 것을 확인할 수 있다. 최종적으로 실제 반향 경로가 변화하는 환경을 고려하여 다양한 방 크기에 의해 반향 경로를 달리하는<sup>[13]</sup> 1분 30초의 그림 2와 동일한 잡음 환경에서의 테스트 샘플에 대하여 제안된 알고리즘을 적용하였다. 그림 5는 다양한 반향 경로를 적용한 테스트 샘플에 대한 ERLE 및 SA 결과를 보여 주고 있다. 그림 5로부터 제안된 알고

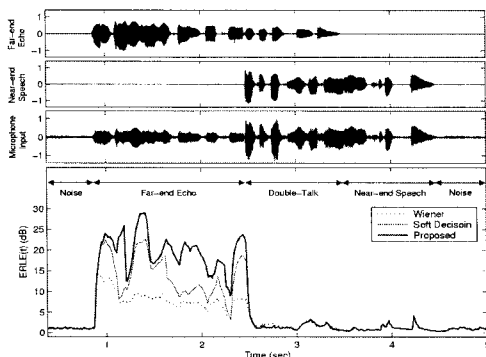


그림 3. 기존의 AES와 제안된 알고리즘의 ERLE 비교 (babble noise, SNR=20 dB)

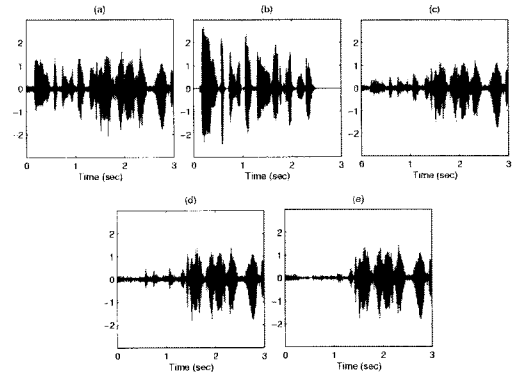


그림 4. 음성 파형 비교 (babble noise, SNR=20 dB): (a) 마이크로폰 입력신호 (b) Far-end 반향신호 (c) 위너필터 기반 AES에 의한 결과 음성 (d) soft decision 기반 AES에 의한 결과 음성 (e) 제안된 RES에 의한 결과 음성.

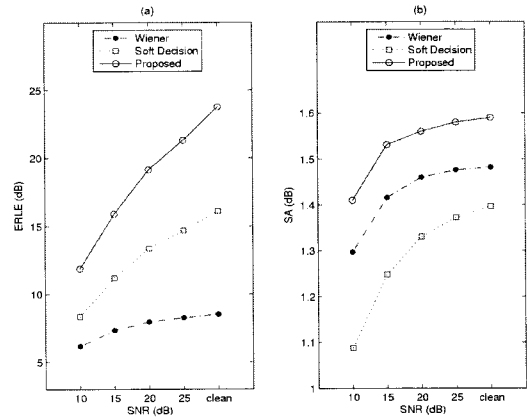


그림 5. 반향 경로가 변화하는 환경에서의 AES 알고리즘의 성능 비교: (a) ERLE 비교 (b) 음성 보존도 (SA) 비교

리즘이 기존의 알고리즘에 대하여 ERLE에서는 향상된 결과를 보이지만 SA에서는 성능저하를 보이는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 제안된 알고리즘의 성능이 (12)식의 문턱 값에 크게 좌우되므로 보다 향상된 성능을 위해서는 효과적인 문턱 값을 적용해야 하는 개선점이 요구된다.

## V. 결론

본 논문에서는 AES 알고리즘에서 잔여 반향신호를 효과적으로 제거하기 위해 새로운 RES 기법을 제안하였다. 제안된 방법은 마이크로폰 입력신호 대 원단 반향신호가 제거된 결과신호의 전력비를 문턱 값에 의한 decision rule에 적용하여 echo-presence uncertainty를 추정하는 TEPU 기법을 RES 필터에 적용하였다. 객관적 테스트 결과로부터 제안된 방법

이 간단하면서도 효과적으로 기존의 방법과 같이 음성 보존도는 비슷하게 유지하면서 잔여 반향 억제에서는 개선된 결과를 나타내었다.

참 고 문 헌

[1] S. J. Park, C. G. Cho, C. Lee, and D. H. Youn, "Integrated echo and noise canceler for hands-free applications," *IEEE Trans. on Circuits and Systems II*, vol. 49, issue 3, pp. 186-195, Mar. 2002.

[2] S. J. Park, C. Lee, and D.H. Youn, "A residual echo cancellation scheme for hands-free telephony," *IEEE Signal Process. Letters*, vol. 9, no. 12, pp. 397-399, Dec. 2002.

[3] V. Turbin, A. Gilloire, and P. Scalart, "Comparison of three post-filtering algorithms for residual acoustic echo reduction," in *Proc. ICASSP*, pp. 307-310, 1997.

[4] S. Y. Lee and N. S. Kim, "A statistical model based residual echo suppression," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 14, no. 10, pp. 758-761, Oct. 2007.

[5] J.-H. Chang, H. G. Kim, and S. Kim, "Residual echo reduction based on MMSE estimator in acoustic echo canceller," *IEICE Electronic Express*, vol. 4, no. 24, pp. 762-767, Dec. 2007.

[6] Y.-S. Park and J.-H. Chang, "Frequency domain acoustic echo suppression based on soft decision," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 16, pp. 53-56, Jan. 2009.

[7] D. Malah, R. Cox, and A. Accardi, "Tracking speech-presence uncertainty to improve speech enhancement in non-stationary noise environments," in *Proc. IEEE ICASSP 1999*, pp. 789-792.

[8] R. J. McAulay and M. L. Malpass, "Speech enhancement using a soft-decision noise suppression filter," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, vol. ASSP-28, pp. 137-145, Apr. 1980.

[9] N. S. Kim and J.-H. Chang, "Spectral enhancement based on global soft decision," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 7, no. 5, pp. 108-110, May 2000.

[10] Y. Ephraim and D. Malah, "Speech enhancement using a minimum mean-square error short-time spectral amplitude estimator," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process.*, vol. ASSP-32, no. 6, pp. 1109-1121, Dec. 1984.

[11] C. Faller and C. Tournery, "Estimating the delay and coloration effect of the acoustic echo path for low complexity echo suppression," in *Proc. Intl. Works. on Acoust. Echo and Noise Control (IWAENC)*, 2005.

[12] O. Cappé, "Elimination of the musical noise phenomenon with the Ephraim and Malah noise suppressor," *IEEE Trans. Speech Audio Process.*, vol. 2 no.2, pp. 345-349, Apr.1994.

[13] S. McGovern, *A model for room acoustics*, 2003 [Online]. Available: <http://2pi.us/rir.html>

[14] 박윤식, 장준혁, "음향학적 반향 억제를 위한 Soft Decision 기반의 동시통화 검출," *한국음향학회지*, 제28권, 제3호, pp. 285-289, 2009. 6월.

박 윤 식 (Yun-Sik Park)

정회원



2006년 2월 인하대학교 전자공학과 학사  
 2008년 2월 인하대학교 전자공학부 석사  
 2008년 3월~현재 인하대학교 전자공학부 박사과정  
 <관심분야> 음성신호처리

장 준 혁 (Joon-Hyuk Chang)

정회원



1998년 2월 경북대학교 전자공학과 학사  
 2000년 2월 서울대학교 전기공학부 석사  
 2004년 2월 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사  
 2000년 3월~2005년 4월 (주)넷더스 연구소장  
 2004년 5월~2005년 4월 캘리포니아 주립대학, 산타바바라 (UCSB) 박사후연구원  
 2005년 5월~2005년 8월 한국과학기술연구원 (KIST) 연구원  
 2005년 9월~현재 인하대학교 전자공학부 조교수  
 <관심분야> 음성신호처리, 오디오신호처리, 통신신호처리, 휴먼/컴퓨터 인터페이스