

# Multi-channel Lattice Predictor를 이용한 효율적인 스테레오 음향 반향 제거기

이 지훈 , 박 영철  
연세대학교 정보기술학부

## A Stereophonic Acoustic Echo Canceller Based on a Multi-channel Lattice Predictor

Ji Hoon Lee, Youngcheol Park  
Division of Information Technology,  
Yonsei University  
msp\_jh@hosu.yonsei.ac.kr

### 요약

본 논문에서는 muti-channel lattice 예측기를 사용하여 AP(affine projection) 알고리즘을 근사적으로 구현하는 알고리즘을 제안한다. Lattice 예측기의 예측 오차를 사용하여 TDL 필터 계수를 적응적으로 조정함으로써 AP 알고리즘을 근사화한다. 또한 전처리 단으로 사용된 lattice 예측기를 TDL 필터와 결합함으로써 기존의 방법보다 계산량을 더욱 줄일 수 있는 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 기존의 알고리즘보다 적은 계산량을 필요로 하지만 AP 알고리즘을 보다 근사적으로 구현할 수 있다는 장점이 있다.

### 1. 서론

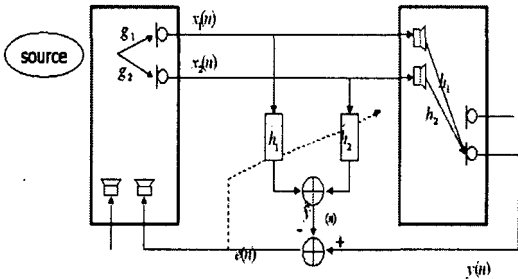
최근 들어 LMS(Least Mean Square)와 LS(Least Square)의 중간 성능을 가지는 AP(affine projection) 알고리즘에 대한 연구가 활발하다. AP 알고리즘은 LS보다 적은 계산량으로 LMS보다 우수한 수렴성능을 나타내지만 역행렬 연산을 필요로 하기 때문에 여전히 많은 계산량을 필요로 한다 [1]. 이를 보완하기 위한 방법으로 Gram-Schmidt

(GS) 예측기를 전처리단으로 사용함으로써 NLMS와 비슷한 계산량으로 AP 알고리즘을 근사적으로 구현하는 알고리즘이 개발 되었다[2]. 그러나 기존의 GS 예측기를 이용한 알고리즘을 스테레오 환경에서 사용하였을 때, 독립적인 두개의 GS 구조와 TDL 구조를 사용함으로써 두 채널간의 완전한 직교화를 구조적으로 이룰 수 없다는 단점이 발생하게 된다. 본 논문에서는 multi-channel lattice 예측기를 사용하여 전처리 단을 구성함으로써, AP 알고리즘을 근사적으로 구현하는 알고리즘을 제안한다. 또한 전처리 단으로 사용된 lattice 예측기를 TDL 필터와 결합함으로써 기존의 방법보다 계산량을 더욱 줄였다. 제안된 알고리즘은 기존의 알고리즘보다 적은 계산량을 필요로 하지만 AP 알고리즘을 보다 근사적으로 구현할 수 있다는 장점이 있다.

### 2. 스테레오 음향 반향 제거기

스테레오 음향 반향 제거기는 <그림 1>과 같이 단일 채널 음향 반향 제거기를 두 채널로 확장한 구조를 띄고 있다. 전송실로부터 하나의 마이크로폰으로 입력되는 원단화자의 음성신호는 반향경로  $G_1, G_2$ 를 거쳐 각 마이크로 입력된다.

여기서  $s(n)$ 은 전송실의 원단화자 음성 신호이고  $G_1, G_2$  은 전송실의 반향 경로를 나타낸다. 수신실의 두 스피커로 전해진  $x_i(n)$ 는 두개의



<그림 1> 스테레오 음향 반향 제거기 구조.

스피커와 하나의 마이크로폰 사이의 반향 경로  $h_1, h_2$  와 컨벌루션 되어 마이크로폰으로 재입력 되어 반향신호  $y(n)$  을 형성하게 된다. 반향 신호  $y(n)$ 을 예측하기 위해서는  $h_1, h_2$ 을 예측하는  $\hat{h}_1(n), \hat{h}_2(n)$ 이 필요하게 되고, 이렇게 얻어진  $\hat{y}(n)$ 을 실제 반향 신호  $y(n)$ 에서 빼줌으로써 음향 반향을 제거 할 수 있다.

이와 같이 스테레오 음향 반향 제거기는 한 채널 반향 신호를 제거하기 위해서 두개의 적응 필터를 사용하여 수신실의 반향 경로를 모델링 하게 된다. 그런데 적응 필터의 입력으로 사용되는 두 입력 신호는 동일한 원단 화자의 음원에서 발생된 신호이기 때문에 두 신호 간에 매우 강한 상관관계를 가지게 된다. 이러한 상관관계는 단 채널 음향 반향 제거기에서는 발생하지 않던 문제점들을 스테레오 반향 제거기에 발생 시키게 되는 원인이 된다. 따라서 적절한 전처리 단을 사용하여 두 입력 신호간의 상관관계를 제거 해 주어야 한다[3,4].

### 3. Affine projection의 근사적 구현

Affine projection 알고리즘은 a posteriori 오차를 제거하는 통계적 gradient 형태의 알고리즘으로 나타낸다. 적응 필터의 길이를  $L$ , projection 차수를  $P$  라고 할 때,  $P$  차의 a priori 오차 벡터  $e(n)$  과  $P$ 차의 a posteriori 오차벡터  $\epsilon(n)$ 은 각각 다음과 같이 표현 된다.

$$e(n) = y(n) - X_C^T(n)h_C(n) \quad (1)$$

$$\epsilon(n) = y(n) - X_C^T(n)h_C(n+1) \quad (2)$$

$$X_C^T(n) = [x_c(n) x_c(n-1) \dots x_c(n-P)] \quad (3)$$

$$x_C(n) = [x_1(n) x_1(n-1) \dots x_1(n-L+1)]^T$$

$$x_2(n) x_2(n-1) \dots x_2(n-L+1)]^T$$

$$y(n) = [y(n) y(n-1) \dots y(n-P+1)]^T \quad (4)$$

위식에서  $h_C(n)$ 은 시간  $n$ 에서 얻어진 적응 필터의 계수 벡터를 나타낸다. AP 알고리즘은  $P$ 개의 오차 벡터  $\epsilon(n)$ 을 영으로 만드는 계수벡터를 찾아가는 알고리즘이므로  $\epsilon(n)$ 을 0으로 놓으면 다음과 같은 계수 조정식을 얻을 수 있다.

$$h_C(n+1) = h_C(n) + X_C(n) [X_C(n)^T X_C(n)]^{-1} e(n) \quad (5)$$

입력신호  $X_C(n)$ 에 대하여 다음과 같은 관계식을 만족시키는 ULT행렬  $T$  가 존재한다고 가정하자.

$$Z_C(n) = X_C(n) T \quad (6)$$

$$Z_C^T(n) Z_C(n) = \text{diag}[\rho_1^2(n) \rho_2^2(n) \dots \rho_r^2(n)] \quad (7)$$

위 식에서  $\rho_i^2(n)$ 은  $Z_C(n)$ 을 구성하는 1번째 벡터의 파워값이다. 변환행렬  $T$  는 ULT 행렬이고 determinant 가 1 이므로 항상 역행렬이 존재하며, 따라서 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다 [2].

$$\begin{aligned} X_C(n) [X_C(n)^T X_C(n)]^{-1} e(n) &= Z_C(n) [Z_C(n)^T Z_C(n)]^{-1} T^T e(n) \\ &= \frac{z_1(n)}{z_1^T(n) z_1(n)} e(n) \end{aligned} \quad (8)$$

따라서 AP 계수갱신을 위하여 역행렬을 계산하는 대신 ULT 행렬  $T$  에 의해 변환된 최종오차 벡터  $z_1(n)$  을 이용함으로써 벡터 연산만으로 계수 갱신이 가능해진다. 변환 행렬  $T$  는 GS 직교화 과정을 통하여 쉽게 얻을 수 있다. 이때  $T$ 는 입력 신호 벡터들 간의 GS 직교화 계수를 의미하게 된다[2].

이상에서 살펴본 바와 같이  $P$  차 AP 알고리즘에서 계수 갱신에 필요한 벡터를 구하는 과정은 입력 신호 벡터를 주 입력 신호 벡터로 하고 과거  $P-1$  개의 입력 신호 벡터들을 참조신호로 하여 블록 단위의 GS 직교화와 동일해진다. 그러나 이러한 알고리즘도 여전히 많은 계산량을 요구하고 있어 다 채널 환경에 적합한 알고리즘으로 사용하기에는 어려움이 따른다. 그러나 LMS 알고리즘이나 RLS 알고리즘 등과 같은 적응 알고리즘을 사용한다면 GS 직교 필터 계수를 재귀적(recursive) 구현 할 수 있다. 다음 장에서는 재귀적인 LS lattice 알고리즘을 이용한 스테레오 환경에서 기존의 방법 보다 적은 계산량으

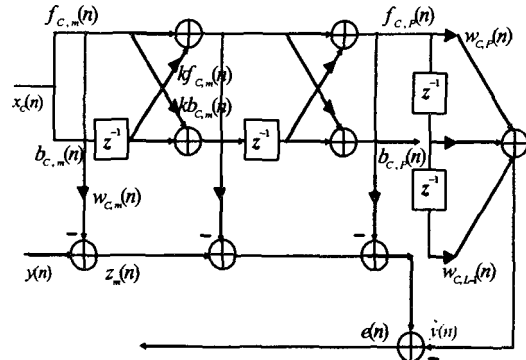
로 AP 알고리즘을 근사적으로 구현 할 수 있는 새로운 방법을 제안한다.

#### 4. MCLTJ 필터

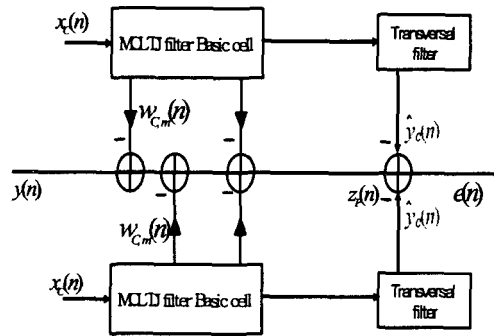
AP 알고리즘을 뒷 절에서 살펴 본 바와 같이 벡터단위의 GS 구조를 이용하여 구현하는 경우 최종 오차벡터를 구하기 위하여  $P-1$  단계를 거쳐서 매 단계마다 오차벡터들을 계산해야 한다. 따라서 최종 오차벡터를 구하지 않더라도 projection 차수  $P$  가 증가함에 따라 계산량이  $LP^2$  에 비례하여 증가하게 된다. 또한, 다 채널 환경에 적용 했을 경우, 각 채널마다 독립적인 GS 직교화 과정이 필요하게 되어 채널의 수에 비례하여 계산량이 증가하게 된다. 결국 GS 직교화를 이용하면 AP 알고리즘을 정확하게 구현 할 수는 있으나 많은 계산량을 요구하므로 실제 구현에는 어려움이 따른다.

본 연구에서는 lattice 예측기를 전처리 단으로 사용하는 알고리즘을 제안한다. Lattice 예측기는 식(7)의 조건을 만족하는 전후방 예측 오차를 제공하기 때문에 기존의 GS 예측기와 동일한 결과를 예측할 수 있다. 이 방법이 기존 LMS보다 빠른 수렴성능을 보이기는 하지만, 예측기를 사용하여 계수를 조정하는 부분과 입력 신호를 필터링하는 부분이 분리되어 있기 때문에 기존의 LMS 방법에 비해 더 많은 메모리를 필요로 하게 된다. 이러한 문제는 lattice 예측기와 입력 필터링을 위한 TDL 부분은 결합함으로써 해결할 수 있다. 이렇게 결합된 LTJ(lattice transversal joint) 필터 구조는 단일 채널을 갖는 반향 제거기에 성공적으로 사용되었다[5]. 한편 LTJ 구조를 스테레오 반향 제거기에 적용하기 위해서는 lattice 예측기를 multi-channel로 구성해야만 한다. 본 논문에서는 multi-channel로 구성된 LTJ (MCLTJ) 필터를 사용하여 스테레오 반향 제거기를 위한 AP알고리즘을 근사적으로 구현하는 방법을 제안한다. 기존 LTJ에 비해 이 방법이 갖는 차이점은 제안된 구조는 궁극적으로 스테레오 AP 알고리즘을 근사적으로 구현하다는 점이다. 제안된 구조는 LS 알고리즘을 사용하여 빠른 수렴속도로 채널간 완전 직교화를 수행함으로써 식 (7)의 조건을 근사적으로 만족시켜 AP 알고리즘과 유사한 성능을 가질 수 있다. 또한 전처리 단으로 사용된 lattice 예측기가 계수 적응 필터

와 결합됨으로써 GS 예측기를 사용하는 기존의 방법보다 적은 계산량을 필요로 한다.



<그림 3> LTJ 필터의 구조.



<그림 4> 제안된 MCLTJ filter 전체 구성도

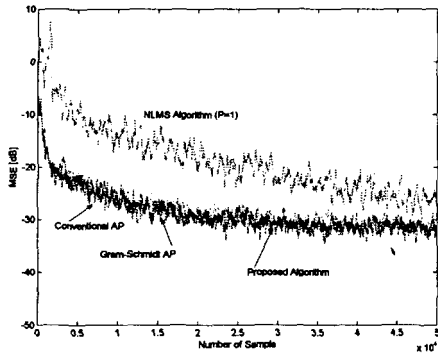
다음은 제안된 필터의 계수적용 방정식을 요약한 것이다.

#### 5. 모의 실험과 결과 고찰

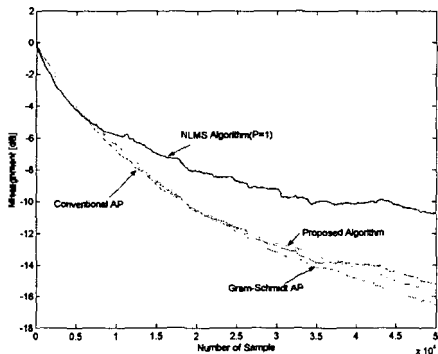
제안한 MCLTJ 필터의 수렴특성과 추적성능을 컴퓨터 모의 실험을 통하여 알아보고, GS 예측기를 사용하여 AP알고리즘을 근사적으로 구현한 기존의 방법과 성능 비교를 통하여 알고리즘을 평가해 본다.

실험에 사용될 입력 신호는 평균 0, 분산 1인 Gaussian 백색잡음을 실제 한국어 모음에서 추출한 10차의 LPC계수를 갖는 AR필터에 통과시켜 얻어냈다. 반향경로는 약  $4m \times 3m$  이 방에서 측정된 실지 반향경로의 임펄스 응답을 256 샘플로 잘라서 사용하였으며, 적응 필터의 길이도 반향경로와 동일한 길이를 가지도록 하였다. 입력신호에 반향경로를 컨벌루션 시켜서 음향반향신호를 만들었으며 약 40dB의 배경 잡음을 반향신호에 더하여 주 입력신호로 사용하였다.

<그림 5>는 각 알고리즘의 MSE를 비교한 것이고, <그림 6>은 misalignment를 비교한 것이다. 결과로부터 알 수 있듯이 MCLTJ를 이용하여 AP 알고리즘을 구현 하였을 경우, GS 알고리즘과 동일한 성능을 가짐을 확인할 수 있다.



<그림 5> 알고리즘간의 MSE 비교(P=4)



<그림 6> 알고리즘간의 Misalignment 비교(P=4)

반면, 제안한 방법은 기존의 방법에 비해 훨씬 적은 계산량을 갖는데, 예를 들어 4차(P=4)일 경우, 기존의 방법은 직교화 과정에서 총 28 ( $8 \times 7/2 = 28$ )개의 적응계수를 사용하는 반면, MCLTJ는 16개( $4 \times 4 = 16$ )의 계수만으로 예측 과정을 수행하게 되며, 이러한 차이는 차수가 높아질수록 커지게 된다. 따라서 제안한 방법으로 affine projection 알고리즘을 구현하는 경우, 성능

은 그대로 유지하면서도 계산량을 현저하게 줄일 수 있다는 점이 입증되었다.

## 7. 결론

본 논문에서는 multi-channel lattice 예측기를 이용하여 스테레오 affine projection 알고리즘을 근사적으로 구현하는 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘에서는 multi-channel lattice 예측기를 TDL 필터와 결합함으로써 기존의 방법에 비해 적은 계산량을 사용하면서 동일한 성능을 얻을 수 있도록 하였다. 제안된 알고리즘을 스테레오 음향 반향 제거기에 적용하여 실험한 결과 효율성을 입증하였다.

## 참고 문헌

- [1] M. Tanaka, Y. Kaneda, S. Makino and J.Kojima, "A fast projection algorithm for adaptive filtering", *IEICE Trans. Fundamentals*, vol.E78-A, No.10, pp1355-1361, Oct. 1995
- [2] 김은숙 "스테레오 음향 반향 제거기의 성능 향상," 박사 학위 논문, 연세대학교, June 1999
- [3] M.M. Sondhi, D.R. Morgan, J.L. Hall, "Sterophonic Acoustic Echo Cancellation - An Overview of the fundamental Problem," *IEEE Signal Processing Letters*, vol2, no8, pp148-151, Aug. 1995.
- [4] J.Benesty, D.R.Morgan, M. M. Sondhi, "A better understanding and an improved solution to the specific problems of stereophonic acoustic echo cancellation," *IEEE Trans. Speech Audio Processing*, vol. 6, pp. 156-165, Mar. 1998.
- [5] Zoran Fejzo, Hanoch Lev-Ari, Senior Member, "Adaptive-Lattice Filters," *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol.45, no.12, Dec, 1997
- [6] T. Furukawa, H. Kubota and S. Tsuji, "The orthogonal Projection Algorithm for Block Adaptive Signal Processing," *Proc. ICASSP*, pp. 1059-1062, 1989