

GS-PAP 알고리즘과 볼테라 필터링을 이용한 비선형 반향 신호 제거

Utilization of A Gauss-Seidel Pseudo Affine Projection Algorithm and Volterra Filtering for Nonlinear Echo Cancellation

서 재범*, 김 덕호**, 김인숙*, 김경재*, 남 상원***
 Jae-Bum Seo, Duk-Ho Kim, and Sang-Won Nam

Abstract - In this paper, a nonlinear echo cancellation approach, based on a Gauss-Seidel pseudo affine projection algorithm and Volterra filtering, is proposed to compensate for echo path nonlinearity in the telephone network. Simulation results demonstrate that the proposed approach yields reduction of computational complexity and improved convergence speed than the conventional nonlinear echo cancellation methods (NLMS, ECLMS, FAP, RLS).

Key Words : Nonlinear echo cancellation, GS-PAP, adaptive filtering, Volterra filtering, ERLE

1. 서론

Echo cancellation(반향신호 제거)에 많이 적용되어온 Gauss-Seidel pseudo affine projection (GS-PAP) 알고리즘 [1]은, affine-projection (AP) 알고리즘을 prediction의 관계로 재해석하여 연산량을 줄인 pseudo affine projection (PAP) 알고리즘에 Gauss-Seidel 방법을 적용하여 계산적인 복잡성을 줄여 연산량뿐만 아니라 수렴성능 또한 개선한 알고리즘이며 선형 반향신호 제거에 널리 적용되어 왔다.

본 논문에서는 전화망 시스템에서 발생하는 비선형 왜곡에 대해 선형시스템에서 적용되었던 GS-PAP 알고리즘[2]을 볼테라 필터링에 확장 적용하여 비선형 왜곡을 보상하는 방법을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 비선형 반향 신호 제거를 위한 GS-PAP 알고리즘을 기반으로 한 볼테라 필터링 기법에 대해 설명하며, 3절에서는 제안된 방법과 기존의 방법들을 비교한 모의실험 결과를 보이고, 끝으로 4절에서 결론을 맺는다.

2. GS-PAP 알고리즘을 적용한 적응 볼테라 필터링

일반적인 비선형 반향신호의 제거기의 구조는 그림 1과 같다. $y[n]$ 는 실제 전화망 시스템에서 발생한 반향신호이고 $\hat{y}[n]$ 은 볼테라 입력벡터 $\mathbf{x}_v[n]$ 과 볼테라 커널 벡터 $\mathbf{h}_v[n]$

을 이용하여 추정된 반향 신호이며, $e[n]$ 은 오차 신호이다

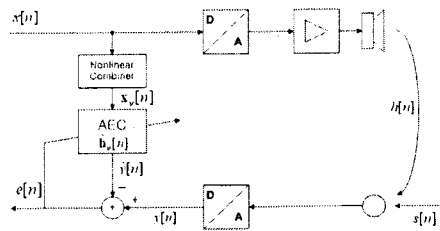


그림 1. 비선형 반향신호 제거기 구조

여기서, $\mathbf{x}_v[n]$ 과 $\mathbf{h}_v[n]$ 은 각각 볼테라 입력 벡터와 볼테라 커널 벡터를 나타내며 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{x}_v[n] = [x[n], \dots, x[n-L+1], x^2[n], x[n]x[n-1], \dots, x[n]x[n-L+1], x^2[n-1], \dots, x[n-1]x[n-L+1], x[n-2]x[n-2], \dots, x^2[n-L+1], x^3[n], \dots, x^2[n]x[n-L+1], \dots, x^3[n-L+1]]^T \quad (1)$$

$$\mathbf{h}_v[n] = [h_1[0], \dots, h_1[L-1], h_2[0,0], h_2[0,1], \dots, h_2[0,L-1], h_2[1,1], \dots, h_2[1,L-1], h_2[2,2], \dots, h_2[L-1,L-1], h_3[0,0,0], \dots, h_3[0,0,L-1], \dots, h_3[L-1,L-1,L-1]]^T \quad (2)$$

식 (1)-(2)에서 L은 반향 경로의 임펄스 응답 $h[n]$ 의 길이, P는 GS-PAP 알고리즘의 projection 차수이며 오차 신호 $e[n]$ 은 다음과 같다

$$e[n] = d[n] - \mathbf{h}_v[n]^T \mathbf{x}_v[n] \quad (3)$$

이 경우 near-end 신호 $s[n]$ 이 존재하면 다음과 같다.

저자 소개

- * 서재범: 漢陽大學 電子通信컴퓨터工學科 碩士課程
- * 김인숙: 漢陽大學 電子通信컴퓨터工學科 碩士課程
- * 김경재: 漢陽大學 電子通信컴퓨터工學科 碩士課程
- ** 김덕호: 漢陽大學 電子通信컴퓨터工學科 碩士
- *** 남상원: 漢陽大學 電子通信컴퓨터工學科 教授 · 工博

$$d[n] = y[n] + s[n] \quad (4)$$

입력 벡터 신호 $x[n]$ 이 stationary 할 때 GS-PAP 알고리즘에서 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\mathbf{R}[n] \begin{pmatrix} 1 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_{p-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{x}^T[n] \mathbf{U}[n] \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$\mathbf{R}[n]$ 은 $x[n]$ 의 autocorrelation 행렬로서, symmetric하고 positive definite 성질을 갖는다.

$$\mathbf{R}_v[n] = \mathbf{X}_v^T[n] \mathbf{X}_v[n] \quad (6)$$

$\mathbf{U}[n]$ 는 근사 decorrelation 벡터이고, $[1 \ a_1 \ \dots \ a_{p-1}]^T$ 벡터는 optimal forward 선형 예측 계수 벡터이다. 이 관계를 3차 볼테라로 모델링된 입력 벡터를 이용하여 확장하여 식 (6)을 정리하면 다음과 같다.

$$\mathbf{R}_v(n) \mathbf{P}_v(n) = \mathbf{b} \quad (7)$$

여기서, 벡터 $\mathbf{P}_v[n]$ 는 선형예측 계수 벡터이고 다음과 같다.

$$\mathbf{P}_v(n) = [1 / \mathbf{x}_v^T[n] \mathbf{U}_v[n] \quad a_1 / \mathbf{x}_v^T[n] \mathbf{U}_v[n] \ \dots \ a_{p-1} / \mathbf{x}_v^T[n] \mathbf{U}_v[n]] \quad (8)$$

식 (7)에서 벡터 \mathbf{b} 는 가장 위에 0이 아닌 원소 1을 갖고 나머지 원소는 모두가 0인, P 개의 원소를 갖는 벡터이다. 식 (8)으로부터 GS 방법을 이용하여 벡터 $\mathbf{P}_v[n]$ 를 다음과 같이 구할 수 있다[1].

$$P_{v(i)}^{(k)} = \left(b_i - \sum_{j < i} R_{v(i,j)} P_{v(j)}^{(k)} - \sum_{j > i} R_{v(i,j)} P_{v(j)}^{(k-1)} \right) / R_{v(i,i)} \quad (9)$$

여기서 $P_{v(i)}$ 는 $\mathbf{P}_v[n]$ 의 i번째 원소이고 $R_{v(i,j)}[n]$ 는 $\mathbf{R}_v[n]$ 의 i 번째 행과 j 번째 열의 원소가 된다. $\mathbf{P}_v[n]$ 을 이용해 $\mathbf{U}_v[n]$ 을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\mathbf{U}_v[n] = \frac{1}{P_{v(0)}[n]} \sum_{i=0}^{p-1} P_{v(i)}[n] \mathbf{x}_v[n-i] \quad (10)$$

식 (10)으로부터 구한 $\mathbf{U}_v[n]$ 을 이용하여 볼테라 적용 필터 계수 벡터 $\hat{\mathbf{h}}_v[n]$ 는 다음과 같이 갱신된다.

$$\hat{\mathbf{h}}_v[n] = \hat{\mathbf{h}}_v[n-1] + \mathbf{U}_v[n] e[n] \quad (11)$$

$$\bar{e}[n] = \frac{\mu}{\mathbf{U}_v^T[n] \mathbf{U}_v[n] + \delta} e[n] \quad (12)$$

여기서, δ 는 정규화 인수이고 μ 는 step-size로 그 범위는 $0 < \mu < 2$ 가 된다. 정규화 인수는 GS-PAP 알고리즘의 안정성과 near-end 신호 발생으로 인해 생기는 수렴 정도를 조절한다. 즉, 다음과 같이 정규화 인수를 실시간으로 갱신하여 near-end 신호 발생으로 인해 발생하는 수렴을 조절하게 된다[2].

$$\delta_n = L \cdot \max \{ (P-1) \cdot \overline{|x_n|^2}, \overline{|s_n|^2} \} \quad (13)$$

여기서, $\overline{|\bullet|^2}$ 는 time-averaged 전력이다.

3. 실험 결과

본 실험에서는 반향 경로의 임펄스 응답을 적용하였다. 임펄스 응답은 최고값에서 급격히 줄어드는 형태를 갖는다. 따라서, 최고값에 비해 상대적으로 적은 값들은 무시될 수 있다. 특히, DAC에 의해 발생하는 비선형 왜곡은 3차 다항식의 형태를 갖고 다음과 같이 모델링할 수 있다[3].

$$f(x) = 1.01333x - 0.01333x^3 \quad (14)$$

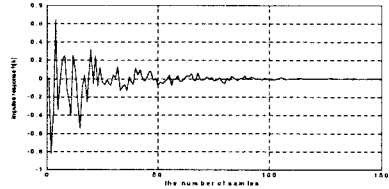


그림 2. Echo path 임펄스 응답

또한 제안된 알고리즘의 정상적인 성능 평가를 위해 Echo Return Loss Enhancement (ERLE)를 적용하였다[4].

$$ERLE = 10 \log_{10} \frac{E\{y^2[n]\}}{E\{e^2[n]\}} \quad (15)$$

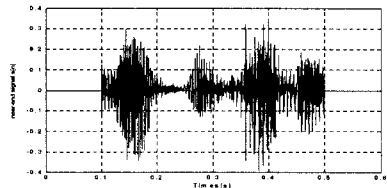
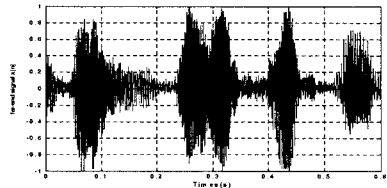


그림 3. Far-end 신호(위) Near-end 신호(아래)

실험에 사용된 음성신호는 실제 전화망에서와 같이 far-end 신호 $x[n]$ 과 near-end 신호 $s[n]$ 을 8 KHz로 샘플링한 음성신호를 사용하였으며, 그 신호의 구성은 0.1초부터 0.5초 구간에서는 far-end신호 및 near-end 신호 $s[n]$ 가 동시에 존재하는 double-talk 구간이며, 나머지 구간인 0초부터 0.1초 전까지와 0.5초 후는 near-end 신호 $s[n]$ 가 존재하지 않는 single talk 구간이다.

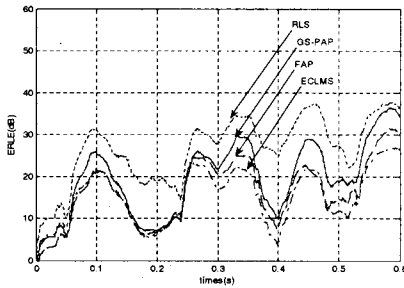


그림 4. ERLE 곡선

본 논문의 실험에서는 비선형 왜곡을 보상하기 위해 1, 3 차 볼테라 필터 기법을 적용하였다. 이 경우, 적응 필터 계수 벡터의 길이 T_L 는 다음과 같다.

$$T_L = L + \frac{L \times (L + 1) \times (L + 2)}{3!} \quad (16)$$

여기서 L은 볼테라 급수의 메모리 수이다.

그림 4는 본 논문에서 제안한 방법과 기존 알고리즘들 (ECLMS, FAP, RLS)의 ERLE 곡선들을 보여준다. 제안한 방법이 보다 높은 반향신호 제거 성능을 보임을 알 수 있다. 표 1에서는 본 논문에 제안된 방법과 기존 알고리즘들의 연산량을 비교 분석하였다.

표 1. 알고리즘의 연산량 비교 ($T_L = 695, 22150, N = 10$)

알고리즘	연산량계산방법	$T_L = 695$	$T_L = 22150$
NLMS	$2T_L + 4$	1394	44304
RLS	T_L^2	483025	490622500
FRLS	$7T_L$	4865	155050
AP	$2T_L N + 20N^2$	15900	445000
FAP	$2T_L + 20N$	1590	44500
GS-PAP	$2T_L + N^2 + 3N + 5$	1525	44435

4. 결 론

본 논문에서는 전화망 등에서의 시스템 성능의 저하 원인이 되는 비선형 반향신호를 제거하기 위해 GS-PAP 알고리즘을 적응 볼테라 필터링에 적용하였다. 모의실험을 통한 ERLE 곡선의 비교 실험으로부터 기존의 ECLMS와 FAP 알고리즘을 이용한 비선형 반향신호 제거 기법보다 제안된 알고리즘이 약 5-8dB 정도의 비선형 반향신호 제거 성능이 개선됨을 확인하였다. 또한 표1에 나타난 것처럼 연산량의 비교에서도 제안된 GS-PAP 알고리즘은 FAP보다는 연산량이 적고 NLMS와 비슷한 연산량으로 ECLMS와 FAP 알고리즘보다 개선된 비선형 반향 신호 제거 성능을 보임을 확인할 수 있었다.

Acknowledgment

This study was supported by a grant of the Korea Health 21 R & D Project, Ministry of Health & Welfare, Republic of Korea (02-PJ3-PG6-EV08-0001).

참 고 문 헌

- [1] F. Albu and A. Fagan, "The Gauss-seidel pseudo affine projection algorithm and its application for echo cancellation," in Proc. of Asilomar Conf., Asilomar Grove, CA, U.S.A, Nov. 2003.
- [2] B. Andrzej, *Nonlinear Aspects of Telecommunications: Discrete Volterra Series and Nonlinear Echo Cancellation*, CRC Press LLC, 2001.
- [3] H. Sheikhzadeh, R.L. Brennan, and K.R.L. Whyte, "Near-end distortion in over-sampled subband adaptive implementation of affine projection algorithm," EUSIPCO-2004, pp. 413-416, 2004.
- [4] D.O. Hwang, S.W. Nam, and H.W. Park, "Nonlinear echo cancellation using a correlation LMS adaptation scheme," Proc. of ICASSP2003, vol. V, pp. 600-603, Hong Kong, Apr. 6-10, 2003.
- [5] F. Kuch, and W. Kellermann, "Nonlinear line echo cancellation using a simplified second order Volterra filter," Proc. of ICASSP 2002, vol. 2, pp. 1117-1120, 2002.