

적은 계산량을 갖는 고속 Kalman/LMS 복합 구조 채널 등화기

서원길, 박재홍, *김민호, 정정화
한양대학교 전자통신전파공학부 CAD 및 통신 회로 연구실
*삼성전자 시스템 LSI

Fast Kalman/LMS Hybrid Equalizer with Low Complexity for HDTV Channel

Won-Kil Seo, Jae Hong Park, *Min Ho Kim, Jong Wha Chong
Hanyang University, Department of Electronics Engineering
CAD & Communication Circuit Lab
*System LSI Division, Samsung Electronics Co., LTD
E-mail : swkil@shira.hanyang.ac.kr

Abstract

본 논문에서는 적은 계산량을 갖는 Fast Kalman/LMS 복합 구조 등화기를 제안한다. HDTV (High Definition Television)의 채널은 긴 지연을 가지는 다중경로가 존재하기 때문에 등화기에 많은 수의 탭이 필요하다. 그러나 실제로 다중경로에 영향을 받는 심볼은 몇 개의 탭에 의해서만 발생한다. 본 논문에서는 훈련 기간 초기에 Fast Kalman 알고리즘을 이용하여 MSE (Mean Squared Error) 값이 특정 임계치 이하가 될 때까지 빠르게 수렴을 시키고, 심볼들에 영향을 주지 않는 탭을 제외한 나머지 탭만을 LMS (Least Mean Square) 알고리즘으로 갱신시킴으로써 계산량을 줄이는 새로운 방법을 제안한다. 시뮬레이션 결과 제안한 방법이 기존의 Fast Kalman/LMS 복합 구조에 비해 적은 계산량으로 비슷한 수렴 속도와 MSE 를 갖는 것을 보여준다.

I. 서론

등화의 기본 목적은 수신기의 성능 저하를 일으키는 ISI (Intersymbol Interference)가 존재하는 채널에서 고속 통신 시스템의 성능을 향상시키는 것이다. 케이블

모뎀이나 HDTV 등의 시스템등에서 SNR (Signal to Noise Ratio)을 증가시키고 SER (Symbol Error Rate)을 낮추려고 몇 가지의 등화 기술이 사용된다.

북미등의 나라에서 잔류 측대파 변조 (8-Vestigial Sideband Modulation: 8-VSB) 방식이 지상파 디지털 텔레비전 전송에 사용된다[1][2]. ATSC (Advanced Television Systems Committee)에서는 HDTV의 전송 시스템과 수신 시스템에 LMS 알고리즘을 사용한 적응 DFE (Decision Feedback Equalizer)를 권장한다[1]. 채널 등화기는 훈련 기간 동안 정확하게 탭의 값을 추정하면 결정 기간에서도 알맞은 탭 값을 찾아 갈 수 있다. 그러나, HDTV의 데이터 프레임 구조에서는 312개 세그먼트에 대해 1개의 세그먼트만이 훈련 심볼로 사용된다. HDTV 채널과 같이 긴 지연을 갖는 다중경로에 의한 ISI를 제거하려면 등화기는 매우 많은 수의 탭이 필요하게 된다 (ATSC는 64개의 feedforward와 192개의 feedback 탭을 권장). LMS 알고리즘은 낮은 하드웨어 복잡도를 가지지만 수렴 속도가 느린 단점이 있다[4][5][7]. 따라서 강한 다중경로 채널 환경에선 짧은 훈련 신호들을 가지고는 시스템에서 필요한 수렴 특성을 보장할 수 없다. 최근에 지상파 방송 환경과 같은 강한 고스트와 fading 채널에 대해 빠른 수렴 특성을 가지는 RLS (Recursive

Least Squares) 알고리즘이 활발히 연구되고 있다[3][5]. RLS 알고리즘 중에서 가장 널리 이용되는 것이 빠른 수렴 속도를 가지는 Kalman 알고리즘과 Fast Kalman 알고리즘이다. 그러나 Kalman 알고리즘과 Fast Kalman 알고리즘은 높은 계산량과 회귀 계산에 따른 불안정성 등의 단점이 있고, 이런 등화기의 단점은 극복하기 위해서 많은 연구가 진행되었다[11]. 하지만 여전히 긴 지연을 갖는 다중경로로 인해 많은 수의 탭이 필요하고, 따라서 높은 계산량이 필요하다는 문제점이 남아있다. 본 논문에서는 혼련 기간 초기에 Fast Kalman 알고리즘을 이용하여 MSE 값이 특정 임계치 이하가 될 때까지 빠르게 수렴을 시키고, 심볼들에 영향을 주는 탭만을 선택하여 LMS 알고리즘으로 갱신시킴으로써 계산량을 줄이는 새로운 방법을 제안한다.

본 논문의 II 항에서는 Fast Kalman 알고리즘에 대해 간략하게 설명하고, III 항에서는 본 논문에서 제안하는 낮은 계산량을 가지는 등화기 구조를 소개하겠다.

항은 제안된 구조에 대한 시뮬레이션 결과이다.

II. Fast Kalman 알고리즘

본 논문에서는 Fast Kalman 알고리즘의 수식 유도 과정을 생략하고 등화기 계수 갱신에 필요한 수식만을 언급한다[3]. 먼저 등화기의 입력은 $y(n)$, 결정 데이터는 $d(n)$ 으로 표현하고, 2 차원 벡터 $\xi_2(n)$ 과 $\rho_2(n)$, 그리고 확장 벡터 $X_M(n)$ 을 다음과 같이 정의한다.

$$\xi_2(n) = [y(n) \ d(n)]^T \quad (1)$$

$$\rho_2(n) = [y(n - N_1) \ d(n - N_2)]^T \quad (2)$$

$$X_M(n) = \begin{bmatrix} y(n+1) & y(n) & \dots & y(n - N_1 + 1) \\ d(n) & d(n-1) & \dots & d(n - N_2) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$S_{MM} \cdot X_M(n) = \begin{bmatrix} \xi_2(n) \\ X_N(n) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$Q_{MM} \cdot X_M(n) = \begin{bmatrix} X_N(n+1) \\ \rho_2(n) \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 n 은 시간, N_1 은 feedforward 필터의 탭수, N_2 는 feedback 필터의 탭수, $M = N_1 + N_2$ 이다. 확장 벡터 $X_M(n)$ 은 치환 행렬 S_{MM} 과 Q_{MM} 에 의해 (4), (5)와 같이 분할된다.

Fast Kalman 알고리즘에 사용되는 행렬과 벡터들은 초기화가 필요하다.

- 1) $N \times 2$ 차 Forward 및 Backward 예측 계수 행렬 $F_{N2}(n)$ 과 $B_{N2}(n)$: $F_{N2}(-1) = B_{N2}(-1) = 0_{N2}$
 - 2) 2×2 차 Forward 예측 에러 상관 행렬 $A_{22}^f(n)$: $A_{22}^f(-1) = \delta I_{22}$
 - 3) $N \times 1$ 차 이득 벡터 $k_N(n)$: $k_N(-1) = 0_N$
 - 4) Instrumental scalar 변수 $\gamma(n)$: $\gamma(-1) = 1$
 - 5) $N \times 1$ 차 등화기 계수 벡터 $C_N(n)$: $C_N(-1) = 0_N$
- 그리고, $n < 0$ 일 때 모든 $x(n) = 0$ 이다.

$$e_2^f(n) = \xi_2(n) + F_{N2}(n-1)^T X_N(n-1). \quad (6)$$

$$e_2^f(n) = \gamma(n-1)e_2^f(n). \quad (7)$$

$$\gamma'(n) = \gamma(n-1) - e_2^f(n)^T A_{22}^f(n-1)^{-1} e_2^f(n). \quad (8)$$

$$A_{22}^f(n) = \lambda A_{22}^f(n-1) + e_2^f(n)e_2^f(n)^T. \quad (9)$$

$$k_N(n) = S_{MM} \begin{bmatrix} e_2^f(n) A_{22}^f(n-1)^{-1} / \lambda \\ \dots \\ k_N(n-1) F_{N2}(n-1) e_2^f(n) A_{22}^f(n-1)^{-1} / \lambda \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$Q_{MM} k_N(n) = \begin{bmatrix} m_N(n) \\ \dots \\ \mu_2(n) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$F_{N2}(n) = F_{N2}(n-1) - k_N(n-1)e_2^f(n)^T. \quad (12)$$

$$e_2^b(n) = \rho_2(n) + B_{N2}(n-1)^T X_N(n), \quad (13)$$

$$\gamma(n) = \gamma'(n) / (1 - \gamma'(n)\mu_2(n)e_2^b(n)^T), \quad (14)$$

$$e_2^b(n) = \gamma(n)e_2^b(n) \quad (15)$$

$$k_N(n) = m_N(n) - B_{N2}(n)\mu_2(n)^T \quad (16)$$

$$B_{N2}(n) = B_{N2}(n-1) + k_N(n)e_2^b(n)^T \quad (17)$$

$$e(n) = d(n) - c_N(n-1)^T X_N \quad (18)$$

$$c_N(n) = c_N(n-1) - \gamma(n)e(n)k_N(n) \quad (19)$$

여기서 점선은 행렬의 분할을 나타내고, λ ($0 < \lambda \leq 1$)는 forgetting factor 이다.

식 (6)과 (7)은 priori forward 예측 에러 $e_2^f(n)$ 과 posteriori forward 예측 에러 $e_2^f(n)$ 를 구하는 식이고, (9)는 forward 예측 에러 상관(correlation) 행렬을, (11)은 forward 예측 계수 행렬을 갱신하는 식이다. (13)은 priori backward 예측 에러, (15)는 posteriori backward 예측 에러를 구하는 식이고, (16)은 Fast Kalman 이득을, (17)은 backward 예측 계수를 갱신하는 식이고, (18)은 등화기의 출력 에러를 구하는 식이다. 마지막으로 (19)는 등화기의 계수를 갱신하는 식이다.

III. 적은 계산량을 갖는 Fast Kalman/LMS 복합 구조

HDTV 시스템에서 채널 특성은 시간에 느리게 변하기 때문에 산재 채널 등화 기술을 적용할 수 있다. 채널의 산재 성이란 수 백 개의 탭들 중에서 중심 탭과 몇 개의 다중경로에 의한 탭만이 심볼 값에 영향을 준다는 것이다. 기존의 산재 채널 등화 방법은 Kalman 알고리즘을 이용하여 채널을 추정하고 MLSE(Maximum Likelihood Sequence Estimation) 사용하여 채널 등화를 수행하였지만, 이러한 방법은 많은 계산량을 필요로 하기 때문에, 최근 발표된 논문에서는 채널 추정 없이 효율적으로 탭을 갱신할 수 있는 구조가 제안되었다[10]. 이 방법은 Kalman 알고리즘에 탭 할당 메모리를 사용하여 무시할 수 있는 값을 가진 탭을 점차적으로 갱신에서 제외시키므로 계산량을 줄이는 것이다. 본 논문은 훈련 기간 초기에 MSE가 특정 임계값 이상일 때 까지는 Fast Kalman 알고리즘을 사용해서 전체 탭을 갱신한 후, 나머지 훈련 심볼들과 312 개 세그먼트의 실제 데이터 부분에는 심볼값에 영향을 주는 탭만을 선택해서 LMS 알고리즘으로 갱신해 나가는 새로운 방법을 제안한다. 그림 2 는 제안된 등화기 구조이고, 그림 3은 순서도를 보여준다.

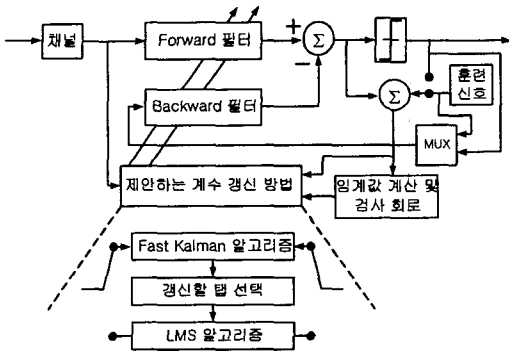


그림 1. Fast Kalman/LMS 복합 구조

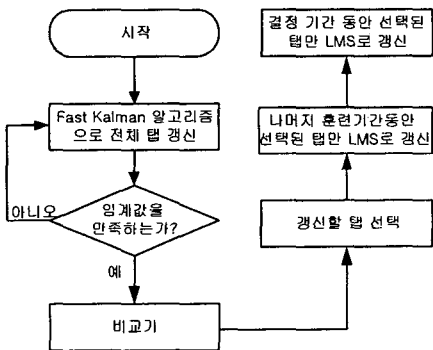


그림 2. 제안된 구조의 순서도

$$T(k) = \left(\sum_{k-m}^k 10 \log_{10} (\text{Average power} / \text{MSE}) \right) / m \quad (20)$$

식 (20)은 임계값을 구하는 식이다. 여기서 m 값은 지터링과 $k \geq N$ (N : 전체 탭의 수)인 상황을 고려해서 결정한다.

IV. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안한 계산량을 줄이면서 빠른 수렴 속도와 회귀 계산에 안정적인 구조의 성능을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 시뮬레이션 환경은, 입력 신호는 8-VSB, 다중 채널 환경은 브라질 채널을 사용하였다. 그림 3 는 브라질 'b' 채널에서 제안된 구조와 기존의 Fast Kalman/LMS 복합 구조의 MSE 곡선이고 그림 4 는 정상도를 비교한 결과이다. 그림 3 를 보면 제안된 탭 할당 메모리를 사용한 Fast Kalman/LMS 복합 구조는 기존의 Fast Kalman/LMS 복합 구조와 마찬가지로 긴 지연과 강한 고스트 채널에서 820 개의 훈련 기간안에 필요한 MSE에 이르는 것을 볼 수 있다.

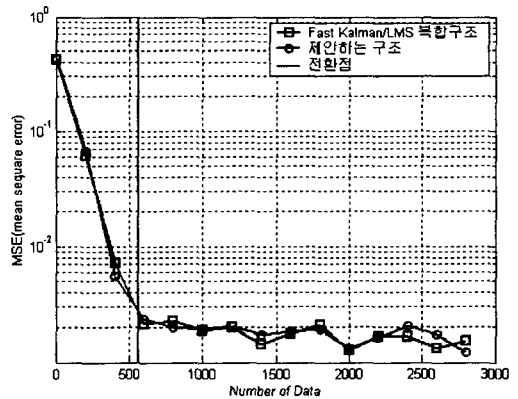


그림 3. MSE 곡선 (브라질'b'채널)

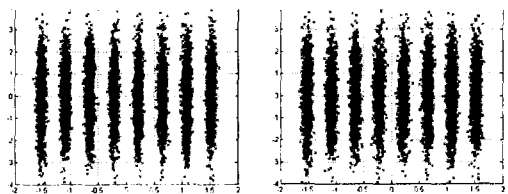


그림 4. 정상도 (브라질'b'채널)

표 1 은 시뮬레이션에 사용된 파라미터들을 보여준다. 비교기의 임계값은 기존의 Fast Kalman/LMS 복합 구조와 비슷한 성능을 내기 위해서 0.005 를 선택했다. 이 임계값은 등화기의 성능에 중요한 영향을 미치기 때문에 신중하게 선택해야 한다. 제안된 탭 할당 메모리를 이용한 Fast Kalman/LMS 복합 구조의 평균적인 탭의 수와 LMS 알고리즘으로 갱신되기 시작하는 심볼을 표 2 에 나타내었다. 표 2 는 제안된 구조에서 Fast Kalman 알고리즘에서 LMS 알고리즘으로 전환되는 시점과 LMS 알고리즘으로 갱신되는 탭의 수를 나타내었다. 표 2.를 보면 제안된 구조가 기존의 복합 구조에서 갱신되는 256 개 (feedforward 64 개, feedback 192 개) 의 탭보다 훨씬 적은 수의 탭들만이 LMS 알고리즘으로 갱신되고, 또한 Fast Kalman 알고리즘에서 LMS 알고리즘으로 빨리 전환되므로 기존의 Fast Kalman/LMS 복합 구조보다 계산량을 줄일수 있다는 것을 보여준다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터

	Only Fast Kalman/LMS Hybrid	Proposed structure
Step-Size	0.0004	Adaptive
Forgetting Factor	1	1
Forward Tap #	64	64
Backward Tap #	192	192
훈련심볼	820	820
SNR	30dB	30dB
비교기 임계값	X	0.005
전환되는 임계값	X	30dB

표 2. LMS 알고리즘으로 갱신될 탭의 수와 전환점

	브라질 'a' 채널	브라질 'b' 채널	브라질 'c' 채널	브라질 'd' 채널
Forward 탭 수	46	50	52	60
Backward 탭 수	68	106	72	110
갱신되는 전체 탭 수	114	156	124	180
전환점	553	598	564	660

V. 결론

본 논문은 긴 지연을 갖는 다중경로와 강한 고스트가 존재하는 채널 환경에서 적은 계산량으로 회귀 에러에 안정적이고, 지상파 HDTV 의 820 개의 짧은 훈련 시간 안에서 필요한 수렴 특성을 보장하는 새로운 Fast Kalman/LMS 복합 구조를 제안하였다. 이러한 방법은 기존의 Fast Kalman/LMS 복합 구조보다 파워 소비를 월등히 줄일 수 있는 장점이 있다. 차후, 칩 제작의 용이성을 위해 하드웨어 복잡도를 좀 더 줄이는 방법에 대한 연구를 진행할 예정이다.

참고문헌

- [1] ATSC Digital Television Standard, Aug. 2001
- [2] Ferrel G. Stremler, Introduction to Communication Systems, 3rd ed, Addison-Wesley, 1990
- [3] S. Haykin, Adaptive Filter Theory, Prentice Hall, 2002
- [4] Bernard Widrow and Samuel D. Stearns, Adaptive Signal Processing, Prentice Hall, 1985
- [5] Shahid U. H. Qureshi, "Adaptive Equalization," *IEEE Proceeding*. Vol. 73, No. 9, Sep.1985
- [6] D.K. Mehra, "A generalized least squares fast transversal filter algorithm for the decision feedback equalization of dispersive channels", *Signal Process.* Vol. 21, Nov. 1990
- [7] Parthapratim Dc, Jay Bao and Tommy Poon, "A calculation-efficient algorithm for decision feedback equalizers," *IEEE Transaction on Consumer Electronics*, Vol. 45, No. 3, Aug. 1999
- [8] David D. Falconer, "Application of fast Kalman estimation to adaptive equalization," *IEEE Transactions on Comm.*, Vol. COM-26, NO. 10, October 1978.
- [9] P. De, J. Bao and T. Poon, "Subspace based decision-feedback equalization," *IEEE Radio and Wireless conference*, Aug. 1999.
- [10] Jae Hong Park, Jung Min Choi, Min Ho Kim, Jung Su Kim, Jong Wha Chong, "Adaptive tap allocation decision feedback equalizer for multipath channel," *Comm. Systems, 2002. ICCS 2002. The 8th International Conference on*, Vol. 1, 2002. page 77-81
- [11] Choi Jong Min, Jung Su Kim, Jae Hong Park, Jong Wha Chong, "Fast Kalman/LMS algorithms on the strong multipath channel," *ICASSP 2003. Proceedings*. Vol: 2 , April 6-10, 2003