

ADAM 기반 가변 스텝사이즈를 이용한 광대역 HF 통신용 DFE 성능

유지상, 최유진, 오동하, 이진양, 이성민, 노정훈

충북대학교

wltd0324@chungbuk.ac.kr, eugene158@chungbuk.ac.kr, odh9452@chungbuk.ac.kr,
dlwlssid1234@chungbuk.ac.kr, seongmin4409@chungbuk.ac.kr, jh.noh@cbnu.ac.kr

Performance Improvement of DFE for Wideband HF Communications using ADAM-based Variable Step-size

Ji-sang Yoo, Yu-jin Choi, Dong-ha Oh, Jin-yang Lee, Seong-min Lee, Jung-hoon Noh
Chungbuk National Univ.

요약

본 논문에서는 MIL-STD-188-110C 광대역 HF 통신 시스템의 수신단 성능을 극대화하기 위해, 기존의 고정 스텝 LMS 혹은 연산량이 높은 RLS 등화기를 대체할 수 있는 Adam(Adaptive Moment Estimation) 기반의 가변 스텝사이즈(Variable Step-Size) DFE를 제안한다. 시뮬레이션을 위해 구축한 HF 수신기는 RRC 정합 필터, 타이밍 복구, 등화기, 그리고 Cross Spectrum Estimator 기반의 위상 복구 루프로 구성된다. 제안하는 기법은 훈련(Training) 구간과 결정 지향(Decision Directed) 구간에서 스텝사이즈를 적응적으로 가변하여, 빠르고 정확하게 채널의 역함수를 추정한다. 시뮬레이션 결과, 기존 LMS-DFE가 약 44% BER로 통신 불능인 환경에서, 24%의 BER로 오차율을 절반 가까이 낮추는 성능을 보였다.

I. 서 론

HF(High Frequency) 대역은 전리층 반사를 이용한 장거리 통신이 가능하지만, 시변 다중경로 페이딩으로 인한 심각한 심볼 간 간섭(ISI)이 발생한다. 특히 군용 표준인 MIL-STD-188-110C와 같은 광대역 전송에서는 ISI 제거를 위한 등화기(Equalizer)의 역할이 필수적이다. 기존 HF 송수신기 시스템에서는 주로 LMS(Least Mean Square) 또는 RLS(Recursive Least Square) 기반의 결정 케환 등화기(DFE)가 사용되었다. 그러나 LMS는 고정된 스텝사이즈로 인해 수렴 속도와 안정성 사이의 트레이드오프(Trade-off)가 존재하며, RLS는 연산 복잡도가 높아 실시간 구현에 제약이 따른다.

이에 본 연구에서는 딥러닝 최적화 기법인 Adam을 적용하여, 채널 상태에 따라 텁별로 스텝사이즈를 자동 조절하는 Adam-LMS 등화기를 제안한다. 특히 수신단 구조 (Receiver Architecture) 내에서 등화기가 타이밍 복구 및 위상 복구 블록과 어떻게 유기적으로 동작하는지를 중점적으로 분석한다.

II. 본론

2.1 수신단 구조 (Receiver Architecture)

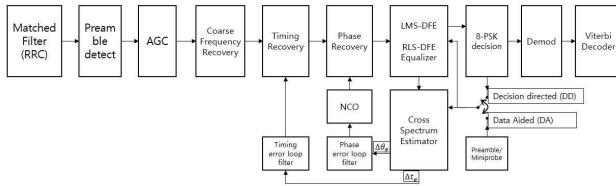


그림.1수신단블록다이어그램

HF 수신 시스템의 신호 처리 체인은 [그림 1]과 같다. 수신 신호는 정합 필터(RRC)와 AGC를 거쳐 기저대역으로 변환된 후, 프레임 동기 및 타이밍 복구 과정을 통해 최적의 심볼 샘플링 시점을 획득한다. 본 논문의 핵심인 Adam-LMS 등화기(DFE)는 잔류 ISI를 제거하여 채널 역특성을 추정하며, 그 출력은 위상 복구 루프(Cross Spectrum Estimator)로 입력되어 잔류 주파수 및 위상 오차를 보정한다. 특히 등화기의 빠른 수렴은 후

단 위상 복구 블록이 안정적인 추적(Tracking)을 시작할 수 있는 환경을 조성한다.

2.2 채널 모델

HF 채널은 ITU-R F.1487 문서에 따라 Watterson 모델을 이용하며, 다중경로 텁을 가정한다. 각 경로는 독립적인 레일리(Rayleigh) 페이딩과 도플러 확산을 겪으며, 상대적 지연 시간과 이득은 일반적인 중위도 지방의 전리층 환경을 모사하도록 설정하였다. L은 경로수, $g_i(t)$ 는 시변 복수 이득, $n(t)$ 는 AWGN이다.

$$r(t) = \sum_{i=1}^L g_i(t)s(t - \tau_i) + n(t)$$

2.3 결정 피드백 등화기(DFE) 구조

HF 채널의 시변 다중경로 페이딩으로 인한 심각한 심볼 간 간섭(ISI)을 효과적으로 제거하기 위해, 본 연구에서는 피드포워드 필터(FFF)와 피드백 필터(FBF)로 구성된 결정 피드백 등화기(DFE) 구조를 채택하였다. 수신 신호 $z[m]$ 가 입력되면, FFF는 현재 심볼보다 앞서 도착한 프리커서 (Precursor) ISI를 억제하고, FBF는 이미 판정된 과거 심볼 $d[m]$ 를 이용하여 포스트커서(Postcursor) ISI를 제거한다. k번째 심볼 시점에서의 등화기 출력 $y[m]$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$y[m] = \sum_{l=-L_{q,FF}}^0 q_{FF}[l]z[m-l] + \sum_{j=1}^{L_{q,FB}} q_{FB}[l]\hat{d}[m-l]$$

여기서 q_{FF} 와 q_{FB} 는 각각 FFF와 FBF의 텁 계수를 나타내며, 필터 텁의 계수는 FFF, FBF에 따라 다음과 같이 업데이트 된다.

$$q_l[m+1] = q_l[m] + 2\mu \cdot e[m]\hat{d}[m-l] \quad \text{for each } l = 1, 2, \dots, L_{q,FB}$$

$$q_l[m+1] = q_l[m] + 2\mu \cdot e[m]z[m-l] \quad \text{for each } l = -L_{q,FF}, \dots, 0$$

위 식은 일반적인 LMS(Least Mean Square) 알고리즘에 기반한 필터 탭 업데이트를 나타내는 수식이다. 위의 수식에서 스텝사이즈 μ 는 필터 계수의 개선 폭(Step Width)을 결정하는 핵심 파라미터로서, 수렴 속도와 안정성을 동시에 확보하기 위해 채널 환경에 부합하는 적절한 값의 설정이 필수적이다. 그러나 고정된 스텝사이즈는 시변하는 채널 환경에서 유연하게 대처하기 어렵다는 구조적 한계를 갖는다.

2.4 Adam-LMS 알고리즘 원리

기존 LMS가 고정된 스텝사이즈를 사용하는 것과 달리, Adam-LMS는 각 탭의 그레디언트 정보를 활용하여 스텝사이즈를 적응적으로 조절한다. k 번째 심볼 시점에서의 오차 $e[k]$ 와 입력 벡터 $x[k]$ 에 대해 순간 그레디언트 $g[k]$ 를 다음과 같이 구한다.

$$g[k] = -e[k]x^*[k]$$

계산된 그레디언트를 바탕으로 1차 모멘트 $m[k]$ 와 2차 모멘트 $v[k]$ 를 아래와 같이 갱신한다.

$$\begin{aligned} m[k] &= \beta_1 m[k-1] + (1 - \beta_1) g[k] \\ v[k] &= \beta_2 v[k-1] + (1 - \beta_2) |g[k]|^2 \end{aligned}$$

여기서 β 는 지수 감쇠율(Exponential Decay Rate)이며, 초기 갱신 단계에서의 편향(Bias)을 보정하기 위해 다음과 같은 보정된 모멘트를 사용한다.

$$\hat{m}[k] = \frac{m[k]}{1 - \beta_1^k}, \hat{v} = \frac{v[k]}{1 - \beta_2^k}$$

최종적으로 필터 탭 계수는 다음과 같이 업데이트 된다.

$$w[k+1] = w[k] + \alpha \frac{\hat{m}[k]}{\sqrt{\hat{v}[k]} + \epsilon}$$

위 식에서 $\alpha / (\sqrt{\hat{v}[k]} + \epsilon)$ 항은 각 탭마다 독립적으로 동작하는 가변 스텝사이즈 역할을 수행한다. 이는 채널의 변화가 크거나 불확실성이 높은 탭의 학습률은 낮춰 안정성을 확보하고, 확실한 방향성을 가진 탭의 학습률은 높여 수렴을 가속화한다.

2.5 Adam-LMS 알고리즘 원리 구현 최적화 및 수신단 연동 전략

실제 HF 통신 환경에서의 성능 극대화를 위해 이원화된 운용 전략을 적용하였다. 프리앰뷸을 활용한 훈련(Training) 구간에서는 빠른 채널 추적을 위해 학습률 파라미터를 크게 설정하여 초기 수렴 속도를 RLS 수준으로 끌어올린다. 반면, 데이터 구간(Decision Directed mode)에서는 오차 전파(Error Propagation)를 억제하기 위해 파라미터를 하향 조정하고 β 값을 조절하여 추적의 안정성을 강화한다. 이러한 Adam-LMS의 고속 수렴 특성은 후단의 위상 복구 루프(Cross Spectrum Estimator)가 초기 과도 응답 구간에서 발산하지 않고 신속하게 락(Lock)을 형성할 수 있도록 돋는다.

III. 시뮬레이션 결과

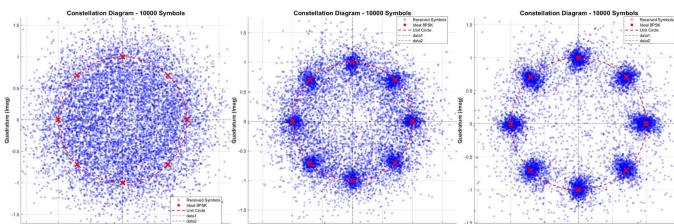


그림2. Doppler spread 1.5Hz에서 성단도

본 연구에서는 제안하는 Adam-LMS 등화기의 성능을 검증하기 위해 MIL-STD-188-110C 규격을 기반으로 15 kHz 대역폭의 광대역 HF 통신

시스템을 모델링하였다. 채널 환경은 ITU-R F.1487 표준의 Watterson 모델을 적용하였으며, 채널 텁은 3개의 멀티 패스 환경으로 구성하였다. 채널의 도플러 스프레드는 [표1]과 같이 0.5, 1.0, 1.5의 도플러 스프레드 환경에서 시뮬레이션은 SNR 30 dB 환경을 기준으로 수행되었으며, 알고리즘별 성단도(Constellation) 비교 및 도플러 확산에 따른 BER 변화를 분석하였다.

먼저 1.5 Hz 도플러 스프레드 환경에서 각 알고리즘의 신호 복원 능력을 성단도를 통해 확인하였다. LMS-DFE의 경우 시변 채널 추적 능력의 한계로 인해 신호점이 결정 경계를 넘어 넓게 분산되는 반면, 제안하는 Adam-DFE는 LMS 대비 훨씬 조밀한 수렴 특성을 보이며 RLS-DFE의 복원 성능에 근접함을 시각적으로 입증하였다. 이는 Adam의 가변 학습률 기법이 급격한 채널 변화 속에서도 안정적인 업데이트 방향을 유지해주기 때문이다. 도플러 확산에 따른 정량적 BER 성능 분석 결과, 저도플러(0.5 Hz) 환경에서 LMS는 20.83%의 BER을 기록한 반면 Adam은 15.15%로 개선된 성능을 보였다. 특히 1.5 Hz의 고도플러 환경에서 LMS의 BER이 44.07%까지 치솟아 통신 불능 상태에 빠지는 것과 달리, Adam은 24.73%의 BER을 유지하며 강력한 추적 성능을 나타내었다. 마지막으로 지연 확산 0.5 ms 환경에서 SNR 변화에 따른 신뢰성을 검증하였다. 표준 Quiet 환경($f_d = 0.1\text{Hz}$) 시뮬레이션 결과, SNR 30 dB 이상에서 BER 대역에 도달하여 시스템이 요구하는 높은 신뢰성을 확보하였다. 이는 제안 기법이 O(N)의 낮은 연산량으로도 가혹한 HF 통신 환경에서 RLS의 성능 상한선(Performance Bound)에 성공적으로 근접할 수 있음을 정량적으로 증명하는 결과이다.

Doppler spread	0.5	1.0	1.5
LMS	20.83%	30.76%	44.07%
ADAM	15.15%	20.89%	24.73%
RLS	6.47%	6.21%	9.86%

표1 도플러 스프레드에 따른 모델별 BER 성능표

IV. 결 론

본 연구에서는 차세대 광대역 HF 통신 시스템의 수신 성능 향상을 위해 딥러닝 최적화 기법을 응용한 Adam 기반 가변 스텝사이즈 등화기를 제안하였다. 제안된 기법은 그레디언트의 1차 및 2차 모멘트를 활용하여 탭별 스텝사이즈를 최적화를 진행하였다. 시뮬레이션 결과, 제안 기법은 기존 LMS 대비 BER 절반으로 줄었으며, 이를 통해 후단 위상 복구 루프의 초기 안정성을 확보하여 전체 수신단의 강인성을 입증하였다. 향후 연구로는 FPGA 기반의 하드웨어 구현을 통해 실시간 처리 성능을 검증하고, 보다 다양한 채널 환경(Disturbed, Distressed 등)에서의 적용성을 테스트할 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] MIL-STD-188-110C, "Interoperability and Performance Standards for Data Modems," 2011.
- [2] Recommendation ITU-R F.1487, "Testing of HF modems with bandwidths of up to about 12 kHz," 2000.
- [3] D. P. Kingma and J. Ba, "Adam: A Method for Stochastic Optimization," ICLR, 2015.