

고속 장거리 광통신을 위한 Volterra 이퀄라이저의 성능 분석

고강현¹, 박한영¹, 최한호², 권우현², 반재준², 강연호¹, 최지웅^{1*}

¹대구경북과학기술원, ²포인트테크놀로지

ericko98@dgist.ac.kr, prkhnyng@dgist.ac.kr, hhchoi@point2tech.com, whkwon@point2tech.com,
jjban@point2tech.com, dusgh7227@dgist.ac.kr, jwchoi@dgist.ac.kr*

Performance Analysis of Volterra Equalizer in High-Speed and Long-Range Optical Communication

Kanghyun Ko¹, Hanyoung Park¹, Hanho Choi², Woohyun Kwon²,

Kevin Ban², Yeonho Kang¹ and Ji-Woong Choi^{1*}

¹Daegu Gyeongbuk Institute of Science and Technology, ²Point2 Technology Inc.

요약

고속·장거리 광통신 시스템에서는 비선형 왜곡이 발생하며 이는 신호 품질을 저하시킨다. 이러한 왜곡을 보상하기 위해 Volterra 이퀄라이저가 제시되었으나, 커널 차수 및 탭 개수 증가에 따라 연산 복잡도가 증가하여 실시간 처리 및 하드웨어 구현에 제약이 따른다. 따라서 본 연구에서는 연산 자원 대비 신호 복원 성능을 평가하기 위해, 커널 차수와 탭 개수에 따른 BER 성능 변화를 분석하였다.

I. 서론

고속·장거리 광통신 시스템에서는 긴 전송 거리에 따라 주파수 처프 (Frequency Chirp), 색 분산(Chromatic Dispersion), 비선형 왜곡이 복합적으로 발생하여 신호 품질 저하 문제가 심각해지고 있다[1]. 이를 해결하기 위해 선형 보상 기법인 FIR(Finite Impulse Response) 필터가 주로 사용되었으나, 선형 왜곡과 비선형 왜곡이 모두 포함된 복합 왜곡을 충분히 제거하는 데에는 한계가 있다[2]. 이에 따라 고차 커널을 사용하는 Volterra 이퀄라이저가 효과적인 대안으로 제시되었다[3]. 하지만 커널 차수와 이퀄라이저의 탭 개수를 늘릴수록 연산 복잡도가 과도하게 증가하는 문제가 발생하고 실제 시스템 성능 향상은 일정 시점 이후 포화 되는 경향이 있다[4]. 이에 따라 본 연구에서는 연산 복잡도와 BER 성능 간의 효율적인 균형점을 도출하기 위해 Volterra 이퀄라이저의 커널 차수 및 탭 개수에 따른 성능을 분석한다.

II. 본론

본 논문에서는 고속 직렬 신호를 전송하는 광통신 시스템과 직접변조/직접검출(Intensity Modulation/Direct Detection, IM/DD) 방식을 기반으로 한다. 이러한 시스템은 초기 모델링 단계에서 수신 신호를 선형 시스템으로 근사할 수 있으며, 그 표현은 다음과 같다.

$$r[n] = h[n] * s[n] \quad (1)$$

여기서 n 은 샘플 인덱스, $s[n]$ 은 송신 신호, $h[n]$ 은 채널 임펄스 응답, $r[n]$ 은 수신 신호를 의미한다. 하지만 실제 시스템에서는 선형 왜곡뿐만 아니라 비선형 왜곡과 잡음 등 다양한 요인이 추가로 작용한다. 따라서 수신기는 왜곡이 복합적으로 적용된 신호를 원본 신호로 복원해야 한다.

광통신 환경에서 발생하는 복합적인 왜곡으로는 첫 번째로 주파수 처프가 있으며, 이는 신호의 시간 축 상에서 확산을 유도해 심볼 간 간섭(ISI)이 심화되고 복원 성능이 저하된다[5]. 또한 송수신 광소자에서는 전압-광 출력 특성의 비선형성으로 인해 진폭-진폭 왜곡(Amplitude-to-Amplitude Distortion, AM-AM) 및 진폭-위상 왜곡(Amplitude-to-Phase Distortion, AM-PM) 왜곡이 발생한다. 광섬유 내부에서는 고출력 운용 시 3차 상호작용, 클리핑과 같은 고차 비선형 효과가 추가로 발생하여 신호 품질을 악화시킨다.

위 문제를 해결하기 위해 선형 및 비선형 왜곡을 동시에 모델링하고 보상할 수 있는 유연한 구조를 갖추고 있는 Volterra 이퀄라이저[6]를 광통신 수신기 설계에 적용하였다. 해당 수식은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \hat{s}[n] = & \sum_{k=0}^{N_1-1} c_1[k] r[n-k] \\ & + \sum_{i=0}^{N_2-1} \sum_{j=i}^{N_2-1} c_2[i, j] r[n-i] r[n-j] \\ & + \sum_{p=0}^{N_3-1} \sum_{q=p}^{N_3-1} \sum_{r=q}^{N_3-1} c_3[p, q, r] r[n-p] r[n-q] r[n-r] \quad (2) \end{aligned}$$

여기서 $\hat{s}[n]$ 은 Volterra 이퀄라이저를 통해 복원된 출력신호이고, N_1, N_2, N_3 는 각각 1차, 2차, 3차 항의 탭 개수이며, $c_1[k], c_2[i, j], c_3[p, q, r]$ 는 해당 차수의 Volterra 커널을 나타낸다. 각 커널 항들은 수신 심볼 시퀀스 내에서 현재 심볼과 이전 심볼들 간의 상호 영향을 반영하기 위해 자기 항과 교차항의 조합으로 구성된다. 이 구조는 수신 신호 $r[n]$ 을 입력으로 받아 선형 왜곡, 2차 비선형 왜곡(AM-AM 및 AM-PM), 3차 비선형 왜곡(광섬유 상호작용, 클리핑 등)을 각 차수 커널을 통해 보상할 수 있다.

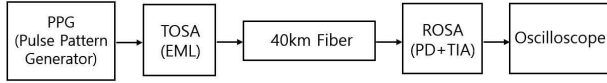


그림 1. 고속·장거리 광통신 실험을 위한 측정 환경 구성도

본 시뮬레이션에서 송신부에서는 PPG(Pulse Pattern Generator)로 NRZ (Non-Return-to-Zero) 변조 신호를 생성한 후, EML(External Modulated Laser)을 이용해 1550nm 광신호로 변환하고, 이를 40km 단일 모드 광섬유(Single-Mode Fiber, SMF)를 통해 전송하였다. 이후 수신부에서는 대역폭이 약 20GHz인 25G Linear ROSA(Receiver Optical Sub-Assembly)로 광신호를 전기 신호로 변환하고, TIA(Transimpedance Amplifier)로 증폭하였다. ROSA의 약 20GHz 대역폭 제한으로 고주파 성분이 일부 감쇠된 신호는, 최종적으로 35GHz 대역폭의 Keysight 86108B 오실로스코프로 측정되었다. 이와 같은 송수신 조건을 바탕으로 모델 학습은 수신 신호의 1000개 심볼을 사용하여 LS(Least Squares) 방식의 커널 계수 추정을 활용하였다. 초기에는 1차 커널만을 학습하고, 이후 2차와 3차 커널을 단계적으로 추가하여 전체 계수를 재추정함으로써 연산 복잡도를 점차 늘리면서도 학습이 불안정해지거나 초반 오차가 커지는 문제를 줄이도록 하였다.

이러한 실험 환경과 학습 절차를 바탕으로, Volterra 이퀄라이저의 구조적 요소가 BER 성능에 미치는 영향을 분석한 결과는 다음과 같다. 이때 이퀄라이저 탭 개수에 따른 성능 변화를 일관되게 분석하고, 커널 차수별 기여도를 명확히 비교하기 위해 N_1 , N_2 , N_3 값을 일치시켰다.

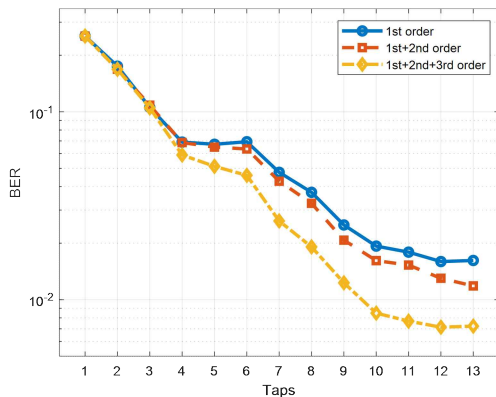


그림 2. 커널 차수와 탭 개수에 따른 BER

첫 번째로 이퀄라이저 탭 개수가 증가할수록 BER이 전반적으로 감소한다. 모든 커널 차수 조합(1차, 1+2차, 1+2+3차)에서 탭 개수가 증가할 때 BER은 지속적으로 낮아졌다. 다만 탭 개수가 10개 이상에 도달한 이후부터는 성능이 포화되는 양상이 관찰되었다. 특히 1차 커널 단독 사용 시, 탭 개수가 11개 이상인 구간에서는 BER이 약 0.018 수준에서 머물렀다. 1차 커널만 사용하는 경우는 일반적인 FIR 이퀄라이저와 동일한 선형 보상 방식이므로, 복잡한 ISI와 비선형 왜곡을 충분히 보상하는 데 한계가 있음을 시사한다.

두 번째로 커널 차수를 증가시킬수록 BER 성능이 뚜렷하게 개선되는 것을 확인할 수 있다. 1차 커널만을 사용할 때보다 2차 커널을 추가한 경우 BER이 전반적으로 감소하였다. 예를 들어, 10개의 탭을 적용한 것을 기준으로 1차 커널 단독 구성의 BER이 0.019였던 반면, 1+2차 커널 구성에서는 0.016으로 약 15.8%의 BER 개선 효과가 나타났다. 이는 AM-AM 및 AM-PM 비선형 왜곡을 보상하는 2차 커널의 기여를 보여준다. 더 나아가

3차 커널까지 포함한 경우, 3차 상호작용 항 및 광클리핑 기반 왜곡까지 추가로 보상되어 BER이 더욱 낮아졌다. 같은 10개의 탭을 적용한 것을 기준으로 1+2+3차 커널 조합은 0.0084의 BER을 기록하여, 1차 커널 단독 대비 절반 이상의 성능 개선을 달성하였다. 다만 탭 개수가 3개 이하로 적을 경우, 과거 심볼 정보를 충분히 활용하지 못해 ISI 보상이 제한되고, 비선형 커널 항들도 효과적인 상호작용 항을 생성하지 못하므로 커널 차수 증가에 따른 성능 향상이 거의 나타나지 않음을 보였다.

III. 결론

본 논문에서는 고속·장거리 광통신 시스템에서 발생하는 복합 왜곡 문제를 해결하기 위해 Volterra 이퀄라이저를 적용하고, 커널 차수 및 탭 개수에 따른 BER 성능을 분석하였다. 시뮬레이션 결과, 탭 개수가 증가할수록 BER 성능이 점진적으로 향상되었고, 커널 차수를 높일수록 선형 및 비선형 왜곡 보상이 더욱 효과적으로 이루어져 전체적인 수신 성능이 개선되었으며, 특히 3차 커널을 포함한 경우는 1차 커널 단독 대비 절반 이상의 BER 개선이 나타났다. 이러한 결과는 복합 왜곡 환경에서는 선형 필터만으로는 한계가 존재하며, Volterra 구조와 같은 비선형 보상 기법이 실질적인 성능 향상에 효과적임을 보여준다. 하지만 일정 탭 개수 이상에서 BER 개선의 한계가 관찰되었다. 향후 연구에서는 이를 극복할 수 있는 고도화된 보상 기법 개발과 함께, 연산 복잡도와와의 균형을 고려한 모델 경량화도 진행할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 연구는 포인투테크놀로지의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] A. Amari, P. Ciblat, and Y. Jaouen, "Fifth-order Volterra series based nonlinear equalizer for long-haul high data rate optical fiber communications," in Proc. 48th Asilomar Conf. Signals, Syst. Comput., Pacific Grove, CA, USA, Nov. 2014, pp. 1367-1371.
- [2] K. Kwon, J.-H. Yoon, Y. Jeon, H. Choi, S. Jeon, and H.-M. Bae, "An electronic dispersion compensation transceiver for 10- and 28-Gb/s directly modulated lasers-based optical links," IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 54, no. 1, pp. 55-64, Jan. 2019.
- [3] N. Stojanovic, F. Karinou, Z. Qiang, and C. Prodaniuc, "Volterra and Wiener equalizers for short reach 100G PAM-4 Applications," J. Lightw. Technol., vol. 35, no. 12, pp. 2524-2535, Jun. 2017.
- [4] J. Pan and C.-H. Cheng, "Nonlinear electrical compensation for the coherent optical OFDM system," J. Lightw. Technol., vol. 29, no. 2, pp. 215-221, Jan. 2011.
- [5] K. Kwon et al., "A 28Gb/s transceiver with chirp-managed EDC for DML systems," in Proc. IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. (ISSCC), Feb. 2018, pp. 265-266.
- [6] K. V. Peddanarappagari and M. Brandt-Pearce, "Volterra series transfer function of single-mode fibers," J. Lightw. Technol., vol. 15, no. 12, pp. 2232-2241, Dec. 1997.