고출력 비선형 직접 변조 레이저의 왜곡현상 개선을 위한 적응형 비트할당 기법

이지융, 박미주*, 전현채
인천대학교

alwn020@inu.ac.kr

Optimal Bit-Allocation to Minimize Nonlinear Distortion in Directly Modulated High-power Lasers

Ji-Yung Lee, Mijoo Park*, Hyunchae Chun

Incheon National Univ.

요 약

비선형 왜곡은 Optical-OFDM 시스템의 성능을 크게 저하시킨다. 본 연구는 고출력 직접 변조 레이저에서 발생하는 비선형 왜곡을 최소화하기 위한 적응형 bit-loading 과 power-loading 기법의 최적화 방법을 분석 하고 검증한다.

Ⅰ. 서 론

무선광통신은 기존 RF 통신의 한계를 극복할 수 있는 차세대 통신 기술로 주목받고 있다. RF 통신은 3kHz~300GHz 의 제한된 주파수 대역을 공유하기 때문에 주파수 경쟁이 심화되고 있다. 반면, 무선광통신은 400THz 이상의 광대역 주파수를 사용해 RF 주파수 포화 문제에 효과적으로 대응할 수 있다.

Optical-OFDM 은 기존 통신에서 쓰이던 OFDM 기술을 광통신에 적용한 방식으로 대용량 데이터 처리, 고속 전송, 장거리 전송에 적합한 차세대 광통신 기술이다. 이는 대역폭을 효율적으로 사용이 가능하고, 다중 부반송파를 병렬 전송함으로써 40Gbps 이상의 초고속 통신이 가능하다. 또한 서브캐리어 단위로 자원을 할당하고, 각 단말 또는 서비스별로 대역폭을 동적으로 조정할 수 있어 다양한 서비스와 융합 네트워크에 적합하다. Optical-OFDM 은 차세대 광가입자망(PON), 장거리 광 전송망 등에서 활발히 연구 및 개발되고 있다[1][2]. 대규모 상용화는 초기 단계이지만, 네트워크 트래픽 증가와 융합 서비스 확산에 따라 그 필요성과 적용이 지속적으로 확대되고 있다.

기존의 Optical-OFDM 은 기술적 한계를 지니고 있으며, 이는 광통신 시스템의 성능 저하와 구현 복잡성 증가로 이어질 수 있다. 다수의 부반송파가 중첩되어 생성되는 OFDM 신호 특성으로 인해 순간적인 높은 전력 피크가 발생하여 광통신 시스템에서 사용되는 LD, E/O modulator 의 비선형성이 증대되어 신호 왜곡이 발생할 수 있다. 직접 검출(DD-OFDM) 시스템에서는 로컬 오실레이터와 송신 레이저 간의 주파수 차이로 인해 ICI 가 심화될 수 있다.

비선형 노이즈란, 시스템이나 장치의 비선형적 특성 때문에 입력 신호가 출력에서 왜곡되거나 원래 없던 주파수 성분이 추가되어 나타나는 잡음이다. 이는 신호 품질 저하의 주된 원인 중 하나이다. 비선형 노이즈의 발생은 고출력 레이저의 사용과 밀접한 관련이 있다. 고출력 레이저 사용 시 광섬유 내 광전력이 임계값을 초과할 경우, Kerr 효과와 같은 비선형 현상으로 인해 비선형 노이즈가 발생하며, SPM, XPM, FWM 와 같은 현상을 통해 신호 왜곡을 초래한다[3]. 고출력 레이저에서 광강도가 증가함에 따라 비선형 위상 잡음이 증폭되어 신호 왜곡이 심해진다. OFDM 은 PAPR 이 높아 피크 전력이 과도하게 커지는데, 레이저나 전력 증폭기의 선형 범위를 초과하면 클리핑 및 왜곡이 발생하여 비선형 노이즈가 발생한다[3]. 또한 OFDM 의 대역폭이 레이저의 변조 대역폭보다 크다면 레이저가 빠르게 반응하지 못하고, 메모리 효과 및 왜곡이 발생하며, 이 또한 비선형 노이즈의 원인이 된다. 광통신에서 비선형 노이즈는 특히 Optical-OFDM 시스템의 성능을 크게 저해한다. SPM, XPM, FWM 등이 OFDM 신호의 위상과 진폭을 왜곡시켜 BER 증가를 유발한다. 비선형 효과로 인해 OFDM 의 직교성이 손실되어 부반송파 간 ICI 가 발생한다. 비선형 노이즈는 광신호의 최대 전송 거리를 감소시키고, 고속 데이터 전송(예 : 100Gbps) 환경에서는 성능 저하를 가속화한다.

Ⅱ. 본론

본 연구는 특정 환경에서 발생하는 비선형 노이즈를 개선하기 위한 알고리즘을 구현하였다. 저주파 성분을 억제하고 고주파 성분을 효율적으로 활용하여 신호를 전송하는 Subcarrier omission (SO) 방식을 제시한다.

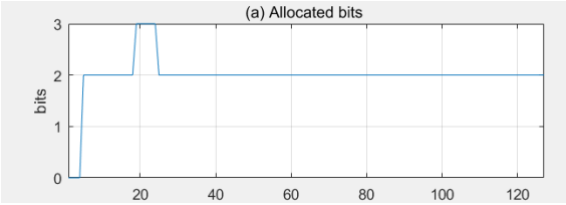
실험 조건은 127 개의 서브캐리어 중 상위 서브캐리어를 점진적으로 제외하는 SO 방식을 적용하면서, 레이저의 비선형성을 관찰 할 수 있도록 다양한 변조 조건에서 테스트 하였다. 그림 1 을 통해 알고리즘이 정상적으로 동작함을 확인할 수 있었다. 기존 방식에서는 모든 서브캐리어에 2~3bit 가 할당되는 반면, 본 알고리즘 적용 시에는 60 번째 서브캐리어부터 3~4bit 가 할당되었음을 확인하였고. 일를 통해 BER 이 0.0038 에서 0.0015 로 2 배이상 개선됨을 실험적으로 검증하였다.

Ⅲ. 결론

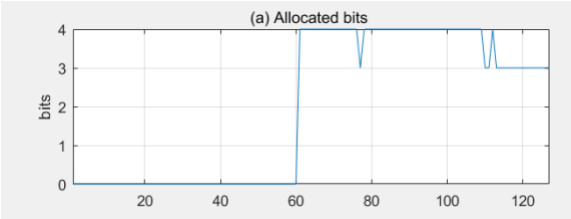
본 논문에서는 비선형 노이즈를 개선하기 위한 기법에 대해 연구하였으며, SO 알고리즘을 적용한 후

비트 할당과 BER 성능을 비교하는 실험을 통해 그 효과를 검증하였다. 향후 연구에서는 광학 RIS 기술과의 접목을 통한 비선형 노이즈의 공간적 분리 및 위성광통신과 같이 고출력 레이저를 필요로하는 환경에서의 통신성능개선 기법으로서 적용가능성 등에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

(a)기존 적응형 비트 할당법



(b) 비선형성 개선을 위한 적응형 비트 할당법



[그림 1] 비트 할당 비교: (a)기존기법 BER = 0.0038, (b) 제안된 기법 BER = 0.0015

ACKNOWLEDGMENT

This research was supported by the MSIT, Korea, under the ITRC support program (IITP-2025-RS-2023-00259061) supervised by the IITP. Also, this work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by MSIT (No.RS-2023-00253346).

참 고 문 헌

[1] Zhengxuan Li, Qinyao Yang, Colorless coherent OFDM-PON based on an optical frequency comb(2025)

[2] Cheikh Kherici, Malika Kandouci, Coherent optical-OFDM system's contribution to the management of chromatic and polarization mode dispersion using DSP(2024)

[3] Bekawade Nirbhay Naresh Namrata , Manoj Singh Tomar, Introductory Review of Impairments in Optical OFDM Systems(2021)