

코히어런트 광통신에서 위상잡음 보상을 위한 저계산 복잡도 DSP 알고리즘 제안 및 분석

박형준*, 정상민*, 한동윤*, 한상국^o

Analysis of Low Computational Complexity DSP Algorithm for Phase Noise Compensation in Coherent Optical Communication Systems

Hyoung-joon Park*, Sang-min Jung*, Dong-yoon Han*, Sang-kook Han^o

요약

코히어런트 초고속 광전송 링크에서는 성능을 열화시키는 잡음요소를 제거하는 것이 더욱 중요하게 대두되고 있다. 그 중 위상잡음과 주파수 오프셋은 위상문제를 일으키는 잡음으로, 신호 처리를 방해하는데 가장 주요한 요인이다. 본 논문에서는 디지털 신호처리 방법을 이용하여 위상잡음과 주파수 오프셋을 보상하는 방법을 제안하였으며 시뮬레이션을 통해 타당성을 검증하였다. 제안된 알고리즘은 기존의 보상 방법들보다 계산 복잡도를 낮추어, 신호 처리속도가 중요한 초고속 코히어런트 광전송 시스템에 있어서 수신기의 신호처리 부담을 완화하였다.

Key Words : digital signal processing, optical network, QPSK, phase noise, carrier frequency offset

ABSTRACT

In coherent superhigh speed optical transmission link, compensating the system impairments are critical issues. Among these issues, phase noise and carrier frequency offset are the most important impairments which interrupt the signal recovery. This paper suggests a algorithm of digital signal processing that compensates the phase noise and carrier frequency offset and verified its validity. The suggested digital signal processing algorithm has a lower computational complexity compared with the previous algorithms, so it can ease the burden of signal processing at the receiver to provide high speed optical transmission system.

I. 서론

다양한 통신서비스의 발달에 따른 사용자들의 요구를 충족하기 위하여 광통신에서는 데이터 전송량 향상이 최근 화두가 되고 있다^[1]. 그중 코히어런트 기반

의 통신방식에서는 100 Gb/s, 400 Gb/s를 넘어 1 Tb/s까지도 연구되고 있다^[2]. 고속의 전송을 위한 고차 변조방식을 사용할 경우 위상잡음과 주파수 오프셋은 가장 중요한 성능 저해 요소이다^[3]. 레이저에서 생기는 위상잡음은 광원에서 생기는 불안정성에 의해

※ 본 연구는 미래창조과학부가 지원한 2013년 정보통신·방송(ICT) 연구개발사업의 연구결과로 수행되었습니다.

• First Author : Broadband Transmission Network Lab, Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, phjokokok@yonsei.ac.kr, 학생회원

◦ Corresponding Author : Broadband Transmission Network Lab, Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, skhan@yonsei.ac.kr, 종신회원

* Broadband Transmission Network Lab, Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University

논문번호 : KICS2014-02-055, Received February 11, 2014; Revised April 28, 2014; Accepted April 29, 2014

발생하며 Wiener process 모델을 따르는데, 이 불안정성은 광원의 선폭을 수 MHz까지 변화시키며 송신단과 수신단의 레이저에서 모두 발생한다⁴¹. 이와 함께 송수신 레이저의 중심 주파수의 차이로 인해 생기는 주파수 오프셋에 의하여 수신된 신호는 본래의 위상 정보를 제대로 검출하지 못하게 되어 전송 성능에 큰 감소를 일으킨다⁵¹. 또한 전송량 향상은 계속되고 있어 위상잡음과 주파수 오프셋을 보상하는 하드웨어의 계산량이 증가되고 있고 이는 하드웨어의 부담을 가중시킨다. 본 논문에서는 새로운 알고리즘으로 디지털 신호처리를 통해 위상 잡음과 주파수 오프셋을 보상하는 방법을 제안하였고 이에 대한 성능을 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

II. 본 론

제안된 DSP 알고리즘을 검증하기 위하여 시뮬레이션 툴을 이용하였다. 시뮬레이션을 통한 링크 구성은 다음과 같다. 데이터 전송속도를 10 Gbps로 하고 전송 변조 방식은 QPSK 신호를 사용하였다. 사용된 송수신 광원의 선폭은 각각 0.1 MHz로 하고 중심 파장은 주파수 오프셋을 설정해주기 위해 각각 1550 nm, 1549.995 nm로 구성하였다. 또한, 송수신 레이저는 서로 기본 위상차이가 없도록 설계하였고 위상차이가 있을 경우에 대해서도 시뮬레이션 하였다.

그림 1은 전체 시뮬레이션 링크의 구조도이다. 송수신 광원은 각각 Tx Laser Diode, Rx Laser Diode 이고, 전송 광파이버의 길이는 30km로 설정하였다.

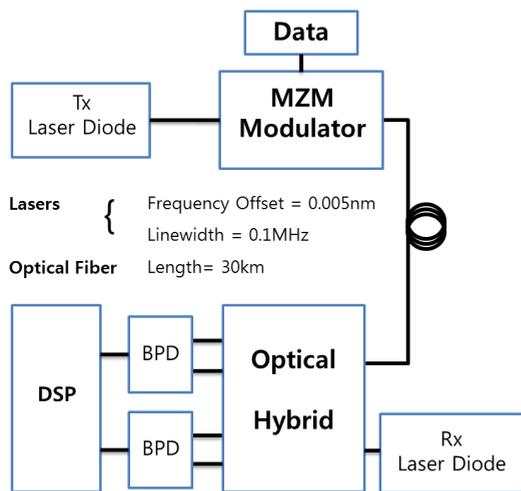


그림 1. 전체 QPSK 광통신시스템 구조
Fig. 1. Structure of QPSK Optical Communication System

레이저는 MZM Modulator에서 변조되어 광 파이버를 지나 수신부에서 처리된다. 수신부에서는 Optical Hybrid와 Band Pass Filter를 통해 신호를 I축과 Q축으로 분리되어 수신한다.

그림 2는 위상잡음과 주파수 오프셋의 영향을 확인하기 위한 정상도이다. 그림 2의 (a)는 위상잡음의 영향을 정상도에서 나타내었는데, 손상된 1000 개의 신호들이 불규칙하게 회전하는 것을 확인할 수 있다. 그림 2의 (b)는 주파수 오프셋의 영향으로 인하여 손상된 1000 개의 신호들이 표현되었다. 여기에서는 주파수 오프셋에 의해 신호의 정상도가 일정하게 회전하는 것을 볼 수 있다.

이와 같이 규칙적, 불규칙적인 위상 변화는 수신부에서 신호 검출에 영향을 주어 전송 성능을 급격하게 하락시키는 원인이 된다⁶¹.

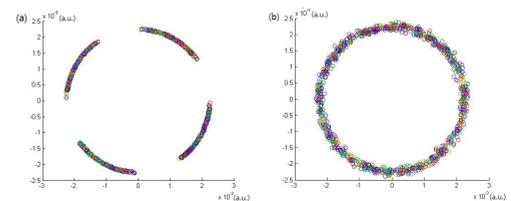


그림 2. (a) 위상잡음에 의한 정상도 변화, (b) 위상잡음, 주파수 오프셋에 의한 정상도
Fig. 2. (a) Effect of phase noise in constellation, (b) Effect of phase noise and frequency offset in constellation

III. 실험

위상잡음과 주파수 오프셋은 다음과 같이 보상하였다. QPSK에서는 각 정상도가 00, 01, 10, 11 위치에 따라 각 심볼의 위치가 정해진다. 첫 신호는 기준을 잡기 위하여 트레이닝 심볼의 역할을 하도록 00 심볼을 가지는 신호를 두 번 보낸다. 이후 수신부에서는 첫 번째 트레이닝 심볼의 신호를 수신하고 복조하여, 수신된 신호 정상도와 실제 00을 나타내는 심볼이 가지는 정상도의 위상 차이를 비교하여 θ_{pn} 이라는 값으로 저장한다. θ_{pn} 은 위상잡음에 의해 신호가 얼마나 손상되었는지 각도로 의미한다.

두 번째 트레이닝 심볼은 신호 수신 후 이를 복조하여, 첫 번째 트레이닝 심볼과 두 번째 트레이닝 심볼 사이의 위상 각도차이를 비교한 후 심볼 시간을 고려하여 주파수 오프셋을 찾고 이를 기본 값인 θ_{cfo1} 으로 설정한다. θ_{cfo1} 은 주파수 오프셋의 기본 추정 값이며 실제 주파수 오프셋과의 주파수 차이는 위상

잡음의 보상과정을 통하여 보상한다. 트레이닝 심볼을 이용한 더 정밀한 주파수 오프셋 보상방법이 있지만 위상잡음 보상과정으로 주파수 오프셋 보상과정에서 생긴 오차도 보상하기 때문에 간단하게 기본값을 계속 사용하는 방법으로 보상하였다^[7].

트레이닝 심볼의 전송 후 데이터를 지닌 신호 심볼이 수신되면 그것을 그림 3과 같이 수신신호 (Received Signal)라고 정의한다. 그림 3과 같이 수신된 신호를 추정된 위상 잡음과 주파수 오프셋을 이용하여 $\theta_{pn} + \theta_{cfo1}$ 만큼 반대로 이동시키고 그 위치를 추측신호(Estimated Signal)라고 정의한다. 보상된 신호는 00, 01, 10, 11 심볼들 중 추측신호에서 최단거리에 있는 심볼을 찾음으로써 구할 수 있고 그 신호 심볼을 보상신호(Compensated Signal)이라고 한다. 이 때, 추측신호와 보상신호 사이의 각도를 θ_{now} 라고 정의한다. 그리고 다음 신호를 받아서 보상하기 위해 θ_{pn} 을 (기존의 $\theta_{pn} + \theta_{now}$) / 2 값으로 갱신한다. 또한, 다음 수신신호에 대한 주파수 오프셋의 보상을 위하여 θ_{cfo} 를 $\theta_{cfo} + \theta_{cfo1}$ 로 갱신한다.

이 과정을 수신된 신호 심볼들에 대하여 지속적으로 반복하면 얻어진 보상신호들로부터 송신한 신호 데이터를 얻을 수 있다. 전체 알고리즘의 순서도는 그림 4에 나타내었다.

기본 시스템 세팅인 선폭 0.1 MHz, 주파수 오프셋 0.005 nm에서의 보상 전후를 그림 5에서 나타내었다. 그림 5의 왼쪽 그림은 위상잡음과 주파수 오프셋에 의해 신호가 완전히 왜곡되어 회전하는 모습을 나타내고 있고 이를 제안한 알고리즘을 통하여 보상한 후의 추측신호들의 위치가 오른쪽 그림에 나타나있다. 제안한 알고리즘에 기반한 디지털 시그널 프로세싱

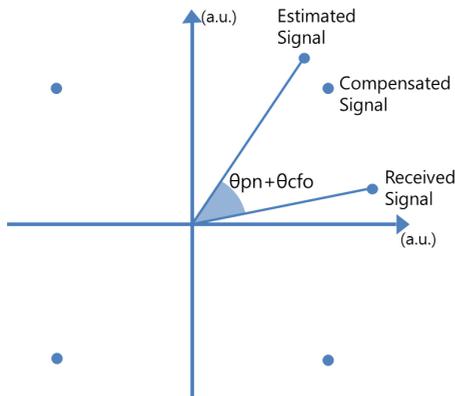


그림 3. 성상도에 나타난 보상과정
Fig. 3. Compensation process in constellation

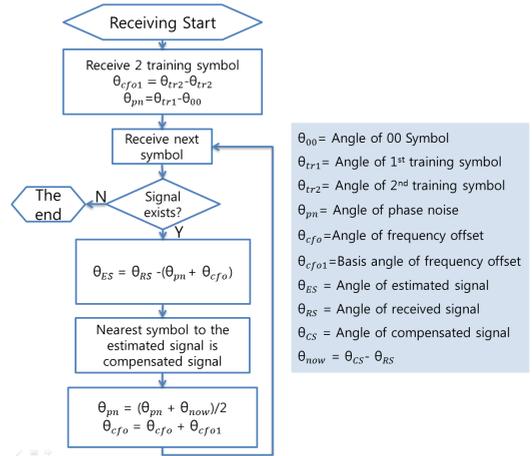


그림 4. 위상잡음, 주파수오프셋 보상알고리즘의 순서도
Fig. 4. Flow chart of phase noise and CFO compensation process

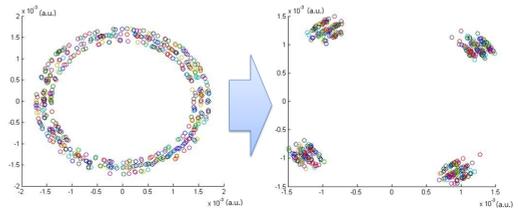


그림 5. 기본 환경에서의 위상잡음, 주파수 오프셋 보상
Fig. 5. Compensation of phase noise and frequency offset in basic setting

의 결과물인 보상신호는 오른쪽 그림에서 볼 수 있는 추측신호들과 최단거리에 있는 심볼을 찾는 과정을 통해 구할 수 있다.

제안하는 알고리즘은 기존의 Viterbi and Viterbi 알고리즘보다 계산복잡도 측면에서 효율적이다. Viterbi and Viterbi 알고리즘은 신호를 모두 수신한 후 모든 심볼에 대해서 Window Size만큼의 계산을 하여야 하는 반면, 제안한 알고리즘은 신호를 모두 수신하지 않고도 과거의 신호에 의해 정해지는 θ_{pn} 를 이용하여 보상할 수 있다. 심볼 개수를 n이라 하였을 때 알고리즘의 시간복잡도를 빅오 표기로 나타내면 Viterbi and Viterbi 알고리즘은 최악일 경우 $O(n \times \text{Window Size})$ 이며 제안하는 알고리즘은 최악일 경우 $O(n)$ 이다.

그림 6과 그림 7에서는 위상잡음 보상 알고리즘이 얼마나 효과적인지를 알아보기 위하여 선폭과 주파수 오프셋에 따른 BER을 시뮬레이션 결과를 통해 나타내었다. 각 그래프의 선폭, 주파수오프셋을 제외한 다른 시뮬레이션 상의 변수들은 위에서 제시한 기본 시

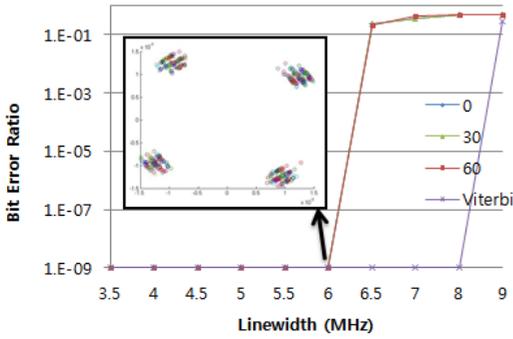


그림 6. 선폭에 따른 BER
Fig. 6. Effect of linewidth on BER

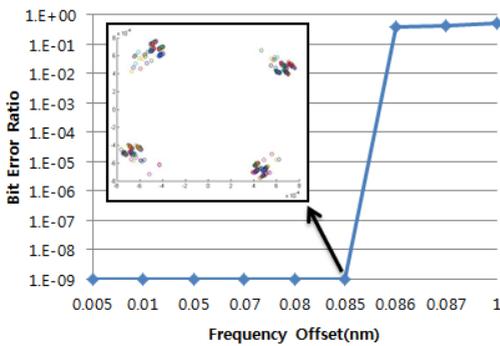


그림 7. 주파수 오프셋에 따른 BER
Fig. 7. Effect of frequency offset on BER

스텝 기본값으로 설정하였다. 그림 6에 0, 30, 60, viterbi라는 4가지 그래프가 나타나져 있는데 각각 두 송수신 레이저 사이의 위상차이가 0도, 30도, 60도 일 때 제안한 알고리즘으로 보상하였을 때의 BER과 Viterbi and Viterbi 알고리즘으로 보상하였을 때의 BER을 나타낸 것이다. 광원의 선폭이 유한하기 때문에 생기는 것이 위상잡음이며 선폭이 증가함에 따라 코히어런트 수신시 광원간의 파장 차이가 많이 나게 되고 그 파장의 차이가 위상잡음을 크게 한다. 그림 6에서 레이저의 선폭이 6 MHz일 때까지는 잘 보상되고 있음을 알 수 있다. 일반적으로 코히어런트 광통신 시스템에서 사용되는 레이저 다이오드는 선폭이 1 MHz이하이기 때문에 결과를 통해 얻은 수치는 효과적이라고 할 수 있다. 화살표가 나타내는 성상도는 선폭이 6 MHz일 때 위상잡음이 보상된 추측신호들을 나타내며 위상잡음에 의하여 왜곡된 신호들이 보상되어 추측신호들이 심볼들 주변에 분포하고 있는 것을 볼 수 있다. Viterbi and Viterbi 알고리즘을 사용한 경우에는 선폭이 8MHz까지 잘 보상되고 있음을 볼 수 있는데 이는 성능면에서 제안한 알고리즘보다 낫

지만, 주로 사용되는 레이저의 선폭이 1 MHz 이하이므로 제안한 알고리즘에 비하여 큰 이점을 가지지 않는다.

그림 6의 위상차이에 따른 BER을 알아보기 위하여 시뮬레이션 하였는데 위상차이에 상관없이 거의 동일하였다. 위상차이에 영향을 받지 않는 이유는 트레이닝 심볼을 보내기 때문이다. 트레이닝 심볼로 초기 위상차이를 기본 위상오류로 인식하기 때문에 그림 6에서 볼 수 있듯 제안한 알고리즘에서 위상차이에 의한 BER 영향은 거의 없다.

주파수 오프셋은 랜덤한 잡음이 아닌 시간에 따라 일관성을 가지는 잡음이기 때문에 주파수 오프셋이 0.05 nm에서도 보상이 된다. 그림 5에서 보면 주파수 오프셋의 0.085 nm 이전까진 모두 보상이 되었고 0.085 nm 이상에서는 레이저 사이의 중심주파수가 차이가 보상 가능 범위 이상으로 커져서 제대로 신호가 검출되지 않았다. 그러나 일반적으로 코히어런트 광통신에서 사용되는 레이저의 중심주파수가 0.085 nm 이상 떨어져 있지 않으므로 본 알고리즘의 성능은 실제 전송 링크에 합당한 성능을 가진다고 할 수 있다. 화살표가 나타내는 성상도는 주파수 오프셋이 0.085 nm 일 때 보상된 신호를 나타낸다. 이때 선폭은 기본값인 0.1 MHz이고 보상된 추측신호는 그림 6에서 보상된 신호와 마찬가지로 심볼들 주변에 분포하고 있는 것을 볼 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 코히어런트 광통신 시스템에서 디지털 시그널 프로세싱을 통해 위상잡음과 주파수 오프셋에 의한 성능열화를 저계산 복잡도로 보상하는 방법을 제안하였다. 일반적인 코히어런트 광통신 시스템에서 사용하는 레이저 다이오드의 선폭이 1 MHz 이하이기 때문에 제안된 알고리즘은 기존 코히어런트 시스템에서도 적용될 수 있다. 또한, 기존의 푸리에 변환을 이용하는 방법들보다 더 간단한 계산을 사용하는 알고리즘을 통하여 보상이 가능하고 이는 실제 코히어런트 광 송수신 기법에 있어서 수신기의 연산 부담을 줄일 수 있어 신속한 신호처리속도가 필요한 초고속전송 시스템에서 이득을 얻을 수 있다.

References

[1] D.-H. Kim, D.-W. Lee, Y.-W. Won, S.-J. Park, and S.-K. Han, "Demonstration of

RSOA based Bidirectional WDM-PON by using Suppressed Optical Carrier Modulation,” *J. KICS*, vol. 32, no. 12, Dec. 2007.

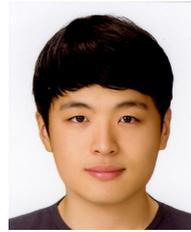
- [2] G. Raybon and P. J. Winzer, “100 Gb/s challenges and solutions,” in *Proc. Optical Fiber Commun.*, San Diego, CA, Feb. 2008.
- [3] G. Colavolpe, T. Foggi, E. Forestieri, and M. Secondini, “Phase noise sensitivity and compensation techniques in long-haul coherent optical links,” in *Proc. IEEE Global Telecommun.*, Miami, FL, pp. 1-6, Dec. 2010.
- [4] U. Mengali and A. N. D’Andrea, *Synchronization Techniques for Digital Receivers (Applications of Communications Theory)*, NewYork: Plenum Press, 1997.
- [5] A. Y. Erdogan, *Analysis of the effects of phase noise and frequency offset in orthogonal frequency division Multiplexing (OFDM) systems*, Amazon Digital Services, Inc. Mar. 2012.
- [6] J. C. Huh, H. K. Lee, D. H. Lee, and J. S. Seo, “Performance of mobile satlite communication systems in random vibration induced phase noise environment,” in *Proc. KICS*, pp. 998-1001, Nov. 1999.
- [7] J.-W. Kim, Y.-O. Park, and W.-W. Kim, “A joint frequency offset measurement using inversely repeated training symbol and cyclic prefix,” *J. KICS*, vol. 36, no. 7, pp. 627-634, Jul. 2011.

박 형 준 (Hyoung-joon Park)



2014년 2월 : 연세대학교 전기 전자공학과 졸업(공학사)
 2014년 3월~현재 : 연세대학교 대학원 전기전자공학과 석· 박사통합과정
 <관심분야> Coherent optical communications, Software-defined optical networks

정 상 민 (Sang-min Jung)



2011년 2월 : 연세대학교 전기 전자공학과 졸업(공학사)
 2011년 3월~현재 : 연세대학교 대학원 전기전자공학과 석· 박사통합과정
 <관심분야> Optical OFDMA-PON, Coherent optical communications

한 동 윤 (Dong-yeon Han)



2014년 2월 : 연세대학교 전기 전자공학과 졸업(공학사)
 2014년 3월~현재 : 연세대학교 대학원 전기전자공학과 석· 박사통합과정
 <관심분야> Coherent optical communications, Software-defined optical networks

한 상 국 (Sang-kook Han)



1986년 2월 : 연세대학교 전자 공학과 졸업 (공학사)
 1988년 2월 : University of Florida (공학석사)
 1994년 2월 : University of Florida (공학박사)
 1996년~현재 : 연세대학교 전기 전자공학과 교수

<관심분야> Optical communication device & system, Microwave Photonics, Optical access networks