DBpia

논문 15-40-10-11 The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences '15-10 Vol.40 No.10
http://dx.doi.org/10.7840/kics.2015.40.10.1940

코히어런트 PON시스템의 I/Q 진폭불균형 분석 및 보상

김 나 영◆, 이 승 우*, 박 영 일°

Analysis and Compensation of I/Q Amplitude Imbalance In Coherent PON Systems

Nayeong Kim◆, Seungwoo Lee*, Youngil Park°

요 약

차세대 광가입자망시스템에서는 전송속도 및 전송거리 향상을 위해 코히어런트 광전송 시스템이 검토되고 있다. 그런데 이 전송방식의 경우 I/Q 불균형 요인에 의해 전송 성능 저하를 일으킬 수 있으며, 가입자 수신부 내부 구조의 비대칭성은 I/Q 진폭불균형의 주 요인이 될 수 있다. 따라서 안정적인 전송 성능 보장을 위해서는 이런 불균형 성분을 제거하거나 보상해주어야 한다. 본 논문에서는 I/Q 진폭불균형의 원인 및 전송 성능에 미치는 영향을 분석하고, 수신부에서 발생하는 I/Q 진폭불균형 요인을 보상하는 방식을 제시하였다. 또한 시뮬레이션을 통해 제안한 방식의 성능을 보인다.

Key Words : Optical Coherent, Coherent Receiver, I/Q Imbalance, Optical coupler, Optical QPSK

ABSTRACT

An optical coherent system is considered for the next-generation optical access networks in enhancing the data rate and transmission distance. In this system, however, I/Q amplitude imbalance may occur at several parts of the system, leading to serious performance degradation. Asymmetric structure of a coherent receiver at the location of subscriber is one of the sources of I/Q imbalance. Therefore, this imbalance parameters must be removed or compensated to secure the transmission performance. In this paper, the source of I/Q amplitude imbalance is analyzed, and then the way to compensate for the imbalance at the receiver side is suggested. Performance after the compensation is estimated using simulation.

Ⅰ. 서 론

가입자망 트래픽의 급격한 수요 증가와 광통신기술의 발전으로 수 십 Gbps 이상의 전송속도를 갖는 NG-PON3 수동광가입자망 시스템에 관한 연구가 진행되고 있다. 그런데 기존의 광통신 시스템에서 사용되는 레이저의 광세기 변화에 의한 데이터 송수신 방식인 IM/DD (Intensity Modulation / Direct Detection) 전송으로는 더 이상의 속도 증가는 한계에 이르렀으며, 이를 극복하기 위해 빛의 세기뿐 아니라 위상을 함께 이용하여 대역폭 효율과 수신감도를 높일 수 있는 코히어런트 전송방식이 등장하였다[1,2]. 이 전송 방식에

※ 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술연구진흥센터의 정보통신·방송 연구개발사업의 일환으로 수행하였음.[(2014-044-012-001)
◆ First Author : Electronics Engineering Department, Kookmin University, nymelody@kookmin.ac.kr, 학생회원
° Corresponding Author : Electronics Engineering Department, Kookmin University, ypark@kookmin.ac.kr, 종신회원
* Electronics Engineering Department, Kookmin University, 학생회원
논문번호 : KICS2015-07-217, Received July 12, 2015; Revised October 7, 2015; Accepted October 13, 2015

www.dbpia.co.kr

서는 대역폭 효율을 높이기 위해 송신부에서 위상차를 갖는 2개의 외부변조기를 이용하여 데이터를 전송하고, 수신부에서는 두 개의 PD (Photo Diode)를 이용하여 DC 오프셋 및 잡음을 제거하는 balanced 수신기 및 송신광원에 주파수와 위상이 동기화된 국부발진기(local oscillator, 이하 LO)를 이용하여 전송신호를 복구하는 방법을 많이 이용한다. 그런데 이 과정에서 송수신부 여러 요인에 의해 I/Q 전송 신호의 불균형이 발생할 수 있으며, 이는 전송성능의 저하로 이어진다[3]. 특히 가입자 위치에 해당하는 ONU (Optical Network Unit)의 경우 이런 I/Q 불균형 요소를 경제성이 높은 방법으로 제거해야 할 것이다.

I/Q 불균형 요소는 진폭 불균형과 위상 불균형으로 나눌 수 있다. 이 중 진폭 불균형은 송신부의 변조기, 수신부의 광분배기 및 PD 등에서의 비대칭성으로 인해 주로 발생한다. 또한 위상 불균형은 송수신부의 위상 천이기, 수신부 로컬 오실레이터 등에서의 위상 오류로 인해 발생하며[4], 따라서 위 두 가지 불균형은 별도로 조정되어야 한다. 가입자망 수신부의 경우 경제성이 고려되어야 하므로 제작과정, 열화 등으로 인해 I/Q 진폭 불균형이 쉽게 발생할 수 있으며, 따라서 본 연구에서는 코히어런트 수신기에서의 I/Q 진폭 불균형에 집중한다. 불균형 요인을 분석하였으며, 또한 이를 보상할 수 있는 처리 방법들을 제안하였고, 보상 전후의 성능을 시뮬레이션을 통해 살펴보았다.

Ⅱ. 코히어런트 광가입자망의 I/Q 불균형

그림 1에서는 Optical QPSK를 이용한 코히어런트 광가입자망 시스템의 기본구조를 보이고 있다[5]. 송신부에서 만들어진 신호는 QPSK 심볼로 변환되고 MZ (Mach-Zehnder) 광변조기에서 Optical QPSK 신호로 변조된다. 생성된 광신호는 광파이버를 지나 광분배기 (Optical Distribution Network, ODN)에서 분배되어 각 ONU의 코히어런트 수신기로 입력된다. 수신된 광신호는 광커플러를 통해 LO 신호와 합해진 후 4개의 PD에서 전자 신호로 변환된 후 그림과 같이 I-branch 및 Q-branch 값을 생성하고, QPSK 신호로 복구된다.

한편, 그림과 같이 코히어런트 수신기는 분기비가 동일한 복수 개의 광커플러 및 응답도가 동일한 복수 개의 PD를 필요로 하는데, 이런 조건들은 주변 환경 변화, 소자의 열화 및 에이징 등에 의해 변할 수 있으며 이는 성능 저하를 일으킨다. 일례로써 아래와 같이 코히어런트 수신기 내부 광커플러들의 분기비 차이에 의한 의한 I/Q 진폭 불균형 현상에 의한 전송성능 저하를 들 수 있다. 그림에서 수신부 광신호(Rx)의 전계를 E_R , LO 광신호 전계를 E_L, 4개 광커플러의 커플링계수를 차례대로 k_1, k_2, k_3, k_4라고 하면 4개 수신 PD의 출력은 아래 식 (1)~(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{PD1} = k_1(1-k_3)(E_{Rr}^2 + E_{Ri}^2) + (1-k_2)k_3(E_{Lr}^2 + E_{Li}^2) + 2\sqrt{k_1}\sqrt{(1-k_2)}\sqrt{k_3}\sqrt{(1-k_3)}(E_{Ri}E_{Lr} - E_{Rr}E_{Li}) \quad (1)$$

$$I_{PD2} = k_1k_3(E_{Rr}^2 + E_{Ri}^2) + (1-k_2)(1-k_3)(E_{Lr}^2 + E_{Li}^2) - 2\sqrt{k_1}\sqrt{(1-k_2)}\sqrt{k_3}\sqrt{(1-k_3)}(E_{Ri}E_{Lr} - E_{Rr}E_{Li}) \quad (2)$$

$$I_{PD3} = (1-k_1)k_4(E_{Rr}^2 + E_{Ri}^2) + k_2(1-k_4)(E_{Lr}^2 + E_{Li}^2) + 2\sqrt{1-k_1}\sqrt{k_2}\sqrt{k_4}\sqrt{(1-k_4)}(E_{Rr}E_{Lr} - E_{Ri}E_{Li}) \quad (3)$$

$$I_{PD4} = (1-k_1)(1-k_4)(E_{Rr}^2 + E_{Ri}^2) + k_2k_4(E_{Lr}^2 + E_{Li}^2) - 2\sqrt{1-k_1}\sqrt{k_2}\sqrt{k_4}\sqrt{(1-k_4)}(E_{Rr}E_{Lr} - E_{Ri}E_{Li}) \quad (4)$$

또한 PD3, PD4의 차이에 의해 만들어지는 I-branch 및 PD5, PD6의 차이에 의해 만들어지는 Q-branch 값은 아래 식 (5)~(6)과 같게 된다.

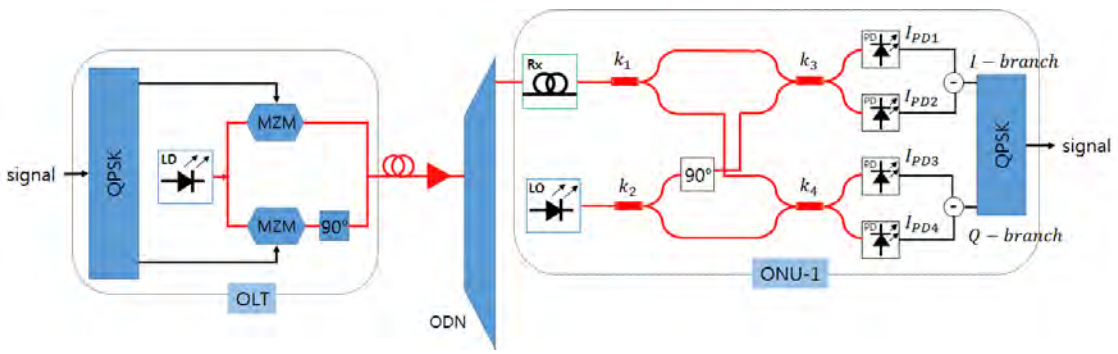


그림 1. 광 QPSK를 이용한 코히어런트 수동광가입자망
Fig. 1. A coherent PON system using optical QPSK

www.dbpia.co.kr

$$I-branch = I_{PD1} - I_{PD2} = k_1(1-2k_3)(E_{Rr}^2 + E_{Ri}^2) + (1-k_2)(2k_3-1)(E_{Lr}^2 + E_{Li}^2) + 4\sqrt{k_1}\sqrt{1-k_2}\sqrt{k_3}\sqrt{1-k_3}(E_{Ri}E_{Lr} - E_{Rr}E_{Li}) \quad (5)$$

$$Q-branch = I_{PD3} - I_{PD4} = (1-k_1)(2k_4-1)(E_{Rr}^2 + E_{Ri}^2) + k_2(1-2k_4)(E_{Lr}^2 + E_{Li}^2) + 4\sqrt{1-k_1}\sqrt{k_2}\sqrt{k_4}\sqrt{1-k_4}(E_{Rr}E_{Lr} - E_{Ri}E_{Li}) \quad (6)$$

위 두 식에서 커플링 계수 k_1, k_2, k_3, k_4가 모두 0.5로 되어 광신호가 두 개의 출력 포트로 균등하게 분배되면 식 (5), (6)의 앞쪽 항이 제거되어서 다음 식 (7), (8)과 같이 단순화되며, 코히어런트 수신기의 장점을 살린 수신을 할 수 있게 된다.

$$I-branch_{balanced} = E_{Ri}E_{Lr} - E_{Rr}E_{Li} \quad (7)$$

$$Q-branch_{balanced} = E_{Rr}E_{Lr} - E_{Ri}E_{Li} \quad (8)$$

그러나 만일 각 광커플러의 커플링계수가 0.5에서 벗어난다면 식 (5), (6)의 앞쪽 항에 해당하는 불균형 성분이 발생하여 수신 성능을 저하시킨다. 이를 I/Q의 진폭 불균형이라고 한다. 본 연구에서는 이와 같은 I/Q 진폭 불균형이 발생되는 경우 이를 위한 보상 방법을 제시하고 성상도 및 비트오율을 통해 각 보상방법의 전송 성능을 비교하였다.

Ⅲ. 수신부 I/Q 진폭 불균형의 보상

앞 절에서 보인 수신부 광분배 계수는 초기 제작시에는 정확하더라도 환경변화, 열화 및 에이징 등에 따라 값이 달라질 수 있으며, 이로 인해 발생하는 I/Q 불균형은 전송성능을 떨어뜨리므로 본 논문에서는 다음과 같은 방식들을 이용한 진폭 불균형 보상 가능성을 살펴보았다.

첫 번째로는 코히어런트 수신기의 Rx 신호 (E_r)와 LO 신호(E_L)의 크기 차를 줄이는 방법을 고려할 수 있다. Rx 신호와 LO 신호의 차이가 클수록 커플러에 의한 I/Q 불균형이 심화되며, 반대로 Rx 신호와 LO 신호의 크기가 비슷할수록 I/Q 불균형은 완화됨을 살펴볼 수 있었다. 즉, I/Q 진폭 불균형의 원인이 되는 식 (5), (6)의 앞쪽 항에서 Rx 신호와 LO 신호의 크기가 비슷하면 앞의 커플링 계수 부분이 상쇄되어 작아진다. 예를 들어 Rx 신호와 LO 신호의 크기가 같고 그 값을 E라고 하면 I/Q 값은 식 (9), (10)과 같이 다시 정리할 수 있다. 정리된 식에서 E 앞의 커플링 계수가 이루는 부분을 보면 k_1과 k_2는 0.5 전후의 값이고 이 두 값에서 1을 빼므로 0에 가까운 값이 나온다. 따라서 Rx 신호와 LO 신호가 비슷한 크기를 가질수록 I/Q 진폭 불균형은 완화된다.

$$I-branch = (k_1 + k_2 - 1)(1-2k_3)E \quad (9)$$

$$Q-branch = (-k_1 - k_2 + 1)(2k_4 - 1)E \quad (10)$$

반대로 Rx 신호 또는 LO 신호 중 한 신호가 월등히 크다면 I/Q 진폭 불균형이 도드라지게 나타난다. 수식적으로 살펴보면 큰 신호를 E라고하면 식 (11), (12)와 같이 표현할 수 있다.

(Rx 신호가 월등히 클 경우)

$$I-branch_{Imbalance} \approx k_1(1-2k_3)E$$
$$Q-branch_{Imbaance} \approx (1-k_1)(2k_4-1)E \quad (11)$$

(LO 신호가 월등히 클 경우)

$$I-branch_{Imbalance} \approx (1-k_2)(2k_3-1)E$$
$$Q-branch_{Imbaance} \approx k_2(1-2k_4)E \quad (12)$$

이 때, E 앞의 커플링 계수가 있는 부분을 비교해 보면 식 (9), (10)의 경우는 0에 가까운 값이지만 (11), (12) 경우는 0.5 내외의 값을 갖는다. 즉, Rx 신호와 LO 신호가 비슷한 값이면 신호 크기 E 앞의 커플링 계수 부분이 작아져 불균형의 원인이 되는 부분이 줄어 I/Q 진폭 불균형이 줄어들고, 두 값의 차이가 크면 E앞의 커플링 계수 부분이 작아지지 않아 불균형의 영향이 그대로 나타난다. 이 보상 방식은 Rx 신호가 큰 경우 적용할 수 있겠으나 Rx 신호가 작아지는 경우 LO 신호도 따라서 작게 조절해야 하며, 이는 코히어런트 수신의 장점을 없애므로 적용이 어렵다.

두 번째로, DC 성분 제거를 통한 성능 개선을 들 수 있다. 이 방법은 아래 그림 2와 같이 수신부 4개의 PD 뒷단에서 DC를 제거하여 불균형을 완화하는 방법이다.

앞에서의 언급과 같이 식 (5), (6)의 앞쪽 항은 불균형을 야기하며, 이 식에서 커플러 계수인 k_1~k_4는 상수 값으로 생각할 수 있다. 그리고 QPSK와 같이 평균 진폭이 일정한 변조에서는 LO 신호와 Rx 신호도 일정한 값으로 상수항이다. LO 신호는 같은 출력하고

www.dbpia.co.kr

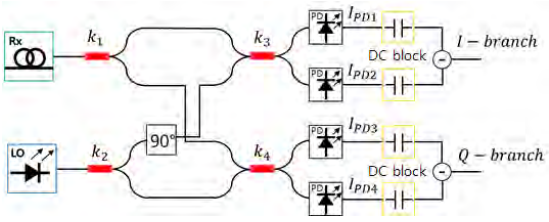


그림 2. DC 성분 제거에 의한 I/Q 불균형 보상
Fig. 2. Compensation of I/Q imbalance by blocking DC components

있고, Rx 신호의 전계는 심볼이 바뀌어도 크기에는 변함이 없기 때문이다. 따라서 불균형을 일으키는 성분 모두가 상수 즉, 일정한 DC 값이므로 이를 상쇄함으로써 I/Q 진폭 불균형을 보상할 수 있다. 그러나 OFDM 변조와 같이 신호 크기 자체가 랜덤하게 바뀌는 경우 Rx 신호를 단순한 DC 값으로 볼 수 없으므로 이 방식을 이용할 수 없다[6].

마지막 방법으로는 커플러 계수를 추정하고, 이를 이용해 각 PD의 수신 값에 가중치를 부여함으로써 비대칭을 상쇄하는 DSP (Digital Signal Processing) 보상 방식을 들 수 있다. 이 방법은 송신 LD와 수신 LO를 번갈아 끄고 키면서 4개 PD 출력으로부터 커플러 계수를 추정한다. 먼저, 송신 LD를 켠 채로 수신 LO를 끄면 다음 식 (13)~(16)과 같이 4개 PD의 출력 값을 얻을 수 있다.

$$I_{PD1} = k_1(1-k_3)(E_{Rr}^2 + E_{Ri}^2) \tag{13}$$

$$I_{PD2} = k_1 k_3(E_{Rr}^2 + E_{Ri}^2) \tag{14}$$

$$I_{PD3} = (1-k_1)k_4(E_{Rr}^2 + E_{Ri}^2) \tag{15}$$

$$I_{PD4} = (1-k_1)(1-k_4)(E_{Rr}^2 + E_{Ri}^2) \tag{16}$$

위 4개의 식으로부터 k_1, k_3, k_4, $E_{Rr}^2 + E_{Ri}^2$ (수신 신호의 전계)를 계산할 수 있다. 또한 반대로 수신부 LO를 켜고 송신 LD를 끄면 각 PD의 출력은 식 (17)~(20)과 같게 되며, 여기에서는 k_2, k_3, k_4, $E_{Lr}^2 + E_{Li}^2$ (LO 신호의 전계)를 구할 수 있다.

$$I_{PD1} = (1-k_2)k_3(E_{Lr}^2 + E_{Li}^2) \tag{17}$$

$$I_{PD2} = (1-k_2)(1-k_3)(E_{Lr}^2 + E_{Li}^2) \tag{18}$$

$$I_{PD3} = k_2(1-k_4)(E_{Lr}^2 + E_{Li}^2) \tag{19}$$

$$I_{PD4} = k_2 k_4(E_{Lr}^2 + E_{Li}^2) \tag{20}$$

위 두 과정을 통해 커플러 계수 k_1~k_4, Rx 신호세기 $E_{Rr}^2 + E_{Ri}^2$, LO 신호세기 $E_{Lr}^2 + E_{Li}^2$를 포함한 총 6개 변수값을 유추할 수 있다. 커플러 계수가 대칭인 경우 수신부 I/Q의 결과는 식 (7), (8)과 같이 되지만 비대칭인 경우 식 (5), (6)과 같이 다른 항들이 나타난다. 위 제안 방식을 이용하여 계산한 6개의 변수값을 식 (5), (6)에 적용하면, $E_{Ri}E_{Lr} - E_{Rr}E_{Li}$ 및 $E_{Rr}E_{Lr} - E_{Ri}E_{Li}$을 계산할 수 있으며, 이는 식 (7), (8)에 해당한다. 즉, 대칭상황에서의 I/Q 값을 추정할 수 있는 것이다. 두 개의 광원을 켜고 꺼는 것이 복잡할 수도 있지만 커플러 계수는 긴 시간에 걸쳐 변화하는 파라미터이므로 긴 주기로 보상이 가능하다. 또한 네트워크에서 분리된 코히어런트 수신기 자체를 테스트하고 보상계수를 미리 결정하는 데에도 제안된 방식을 유용하게 이용할 수 있다.

Ⅳ. 제안된 보상 방식들의 성능 분석

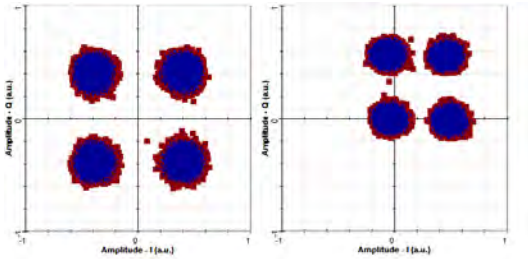
위에서 제시한 보상방법을 Optisystem과 Matlab을 사용하여 분석하였다. 시뮬레이션을 통해 성상도와 비트오율을 살펴보았으며 이를 통해 보상방식들을 비교하였다. 성능 분석을 위한 전송 조건은 표 1과 같다[7]. 표에서 커플러 계수는 에이징에 의한 파이버 타입 커플러의 특성을 측정하여 반영한 것이다. 시뮬레이션 전 과정에서 파장과 광파이버의 특성에 따른 색분산을 보상하였다[8].

먼저 I/Q 진폭 불균형이 존재할 때와 존재하지 않을 때의 성상도를 분석하였다. 그림 3(a)는 커플러가 정확히 0.5로 대칭 분기되었을 때의 성상도이며, 그림 3(b)는 표 1의 불균형 커플러 계수를 반영했을 때의 결과이다. 대칭일 경우 성상도에는 각 심볼의 위치가 올바르게 찍혀있지만, 커플러 계수가 불균형을 보일 경우 각 심볼의 위치가 이동해 있는 것을 볼 수 있다.

이러한 성능 차이는 비트오율에서도 확인할 수 있었다. 균형 상태에서는 비트오율이 0으로 좋은 수신 성능을 보인다. 하지만 후자의 경우, 불균형이 존재할 때는 0.172로 현저한 성능 저하가 나타난다. 즉, 커플러에서 분배가 균등하게 이루어지지 않으면 I/Q 진폭 불균형으로 인해 통신 성능의 급격한 저하가 나타나는 것을 볼 수 있었다.

한편, 불균형 환경에 대해서는 위 3절에서 제시했

www.dbpia.co.kr



(a) (b)

그림 3. I/Q 진폭불균형 여부에 따른 QPSK 성좌도
Fig. 3. Constellation of QPSK on I/Q amplitude imbalance (a) I/Q balanced (b) I/Q imbalanced

표 1. 수동광가입자망에서 IQ 진폭불균형 시뮬레이션을 위한 파라미터
Table 1. Parameters of PON system for simulation on I/Q amplitude imbalance

Parameter	Value
Data Rate	30 Gbps
Optical Modulation	QPSK
Transmission Distance	100 km
Transmitted Power	0 dBm
LO Power	0 dBm
Number of ONUs	16
Fiber Attenuation	0.2 dB/km
Coupling Coefficient	k_1=0.38, k_2=0.53 k_3=0.58, k_4=0.41

던 3가지 보상방법을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 첫 번째 보상 방식인 Rx 신호와 LO 신호의 크기 차이를 줄이는 방법에서는 Rx 수신신호의 크기가 -15.27 dBm 상황에서 LO 크기를 변화했을 때 비트오율은 그림 5와 같게 측정되었다. LO 신호를 1 dBm 단위로 변경할 때 Rx 크기와 가장 근접한 -15 dBm에서 비트오율이 가장 적으며, Rx 크기와 LO 크기의 차이가 커질수록 비트오율 성능이 점점 나빠지는 것을 확인할 수 있다. 그러나 이 방식에서는 최적의 조건에서도 10^{-5} 정도의 비트오율이 발생하였으며, 그 이유는 LO 신호세기가 충분히 크지 못하기 때문이다.

코히어런트 수신방식에서는 Rx 신호가 작은 환경에서도 Rx와 동기화된 LO 신호에 의해 원래의 신호를 증폭하는 효과를 얻을 수 있고 이로 인해 수신기 감도의 향상 효과가 있는데, I/Q 불균형 보상을 위해 LO 신호 세기를 줄인다면 코히어런트 전송의 장점을 충분히 이용하지 못하기 때문에 성능에 제한이 발생한 것이다.

두 번째 보상 방식으로서, DC 성분을 제거한 후 성능을 살펴보았다. DC 성분 제거를 위해 그림 2와 같이 4개의 PD 뒷단에 커패시터를 두었다. DC 성분 제

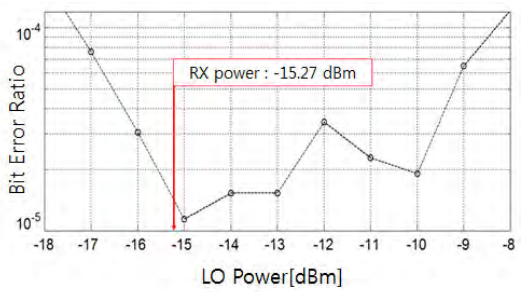
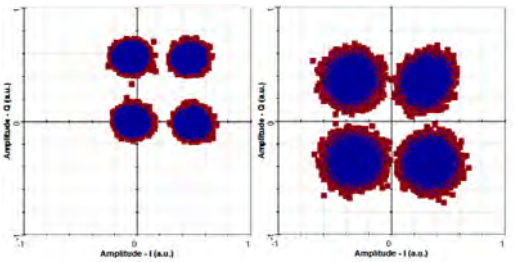


그림 4. LO 세기에 따른 비트오율
Fig. 4. Bit error rates with different LO intensity



(a) (b)

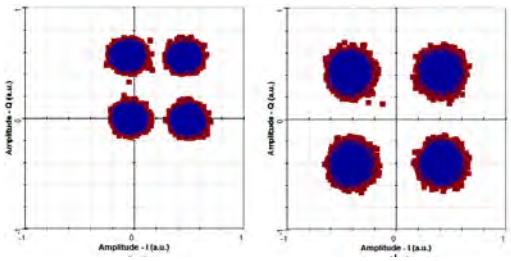
그림 5. DC 성분 제거에 따른 성좌도
Fig. 5. Constellation with blocking of DC components (a) before DC blocking (b) after DC blocking

거 전후의 성상도는 각각 그림 5(a) 및 그림 5(b)와 같았으며, 비트오율은 각각 0.172 및 0 에 해당하였다. 이를 통해 볼 때 DC 제거는 비교적 간단하게 I/Q 진폭 불균형 영향을 감소하는 방식으로 볼 수 있다. 그렇지만 이 방식의 경우 성상도의 중심을 원점으로 가져오기는 하지만 식 (5), (6)에서 확인할 수 있듯이 I 성분과 Q 성분을 불균형은 여전히 존재하게 된다. 이는 분산 및 잡음 등으로 성상도에 퍼짐이 발생했을 때 오류에 취약함을 의미한다. 또한 이 방식의 경우 OFDM 변조와 같이 신호 크기의 평균값이 계속 변화하는 경우 신호 자체를 왜곡하게 되므로 오류를 일으킬 수 있다.

마지막으로 커플러 계수를 추정하여 출력을 보상하는 DSP 보상방식의 성능을 살펴보았다. 이 방식의 적용을 위해서는 송수신 광원을 번갈아 끄면서 4개 PD 값을 측정함으로써 4개의 커플링 계수와 Rx 신호, LO 신호를 표 2와 같이 구할 수 있었다. 그 결과 시뮬레이션 측정에 의해 얻은 커플러 계수는 표 1에 주어졌던 원래의 값과 거의 동일함을 확인할 수 있었다.

이렇게 유추한 커플러 계수를 식 (5), (6)에 적용하여 식 (7), (8)에서 보이는 I/Q 균형 출력값을 계산해 냄으로써 보상하였다. 그림 6은 이와 같은 과정을 통

www.dbpia.co.kr



(a) (b)

그림 6. 커플러계수 추정을 이용한 DSP 방식 보상
Fig. 6. DSP-based compensation using estimated coupler coefficients (a) before compensation (b) after compensation

표 2. 제안방식에 의해 유추한 커플러 계수 및 RX LO의 전계
Table 2. Coupler coefficients and electric field of RX and LO estimated from the proposed scheme

Estimation with LO turned-off			
k_1	k_3	k_4	R_x
0.380029	0.579974	0.410017	0.000163
Estimation with TX turned-off			
k_2	k_3	k_4	L_O
0.529999	0.579997	0.410003	0.001000

해 보상한 결과를 나타낸 성상도이다. 그림 6(a)는 I/Q 진폭 불균형이 존재할 때이고, 그림 6(b)는 커플링 계수 유추에 의한 DSP 보상 후의 성상도로서 I, Q의 값이 원점을 중심으로 정확히 대칭이 되어 있으며 퍼짐도 최소화된 것을 볼 수 있다.

그림 5에서 제시한 DC성분 제거 경우에 비해 성상도 심볼 간격이 넓어 더 강인한 통신성능이 예측된다. 이 방식을 이용한 비트오율 측정을 그림 7에 보이고 있다. 표 1에 제시한 불균형 커플링 계수들을 갖는 조건에서는 비트오율이 0.5에 이를 정도로 나쁘지만, 제안한 DSP 보상방식을 적용하는 경우 비트오율이 대폭 개선되었으며, 균형 상태와 비교할 때 파워 페널티는 2 dB 이내가 됨을 관찰할 수 있었다.

한편, 이 보상 방식을 커플링 계수가 연속적으로 변

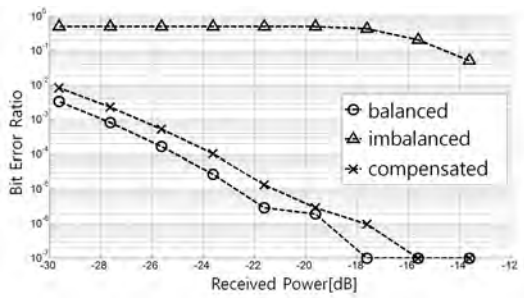


그림 7. DSP 방식 보상을 이용한 비트오율 성능 향상
Fig. 7. BER improvement with DSP-based compensation

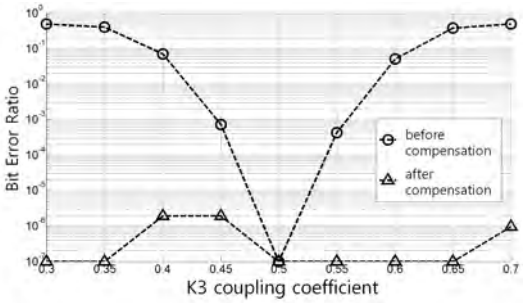


그림 8. 커플링 계수 변화에 따른 DSP 보상된 비트오율
Fig. 8. BERs with DSP-based compensation for different coupling coefficient k3

하는 경우에 대해서도 적용을 해보았다. 그림 2의 수신부 구성도에서 k_3 값이 변화할 때 보상 전·후의 비트오율을 그림 8에 보인다. 비대칭 상황에서 급격하게 증가하는 비트오율이 보상 후에는 매우 낮아져서 대부분 10^{-7} 이하로 내려가는 것을 확인할 수 있다.

커플링 계수를 유추하여 신호를 복구하는 DSP 보상방식은 모든 커플링 계수를 유추해 I/Q 진폭 균형을 이루는 신호를 재생산하는 방식이므로 다른 가능한 보상 방식들에 비해 더욱 효율적인 방식으로 판단되며, 지속적으로 크기가 변하는 OFDM과 같은 차세대 광가입자망의 변조신호에도 적용이 가능할 것으로 예상된다.

V. 결 론

초고속 광가입자망 구현을 위해 코히어런트 수신기의 필요성이 커지고 있는 가운데 여기에서 발생할 수 있는 I/Q 진폭불균형에 대해 살펴보고, 이를 보상할 수 있는 방법들을 제안하였다. LO 신호세기를 수신신호 세기에 맞춰 I/Q 진폭 불균형을 보상하는 방법의 경우 성능 개선을 확인할 수는 있었으나, 수신 광신호 세기에 맞추어 LO 신호도 작아져야 하므로 한계가 있음을 보았다. 또한 DC 성분 제거 방식의 경우 성상도와 비트오율을 통해 성능 개선을 확인했지만 I/Q 비대칭을 완전히 해소하지는 못했고 사용 가능한 변조방식에도 제한이 따른다. 마지막으로 송수신 광원을 교대로 켜고 끄면서 측정한 PD 출력을 이용하여 수신부각 커플러 계수를 유추하고, 이를 이용해 대칭 경우 I/Q 출력값을 계산하는 DSP 보상 방법을 제안하였다. 이 방법을 통해 I/Q 균형 형태의 성상도를 복구함으로써 강인한 통신성능을 갖음을 확인할 수 있었다. 이 방식을 이용함으로써 정확한 I/Q 균형이 요구되는 코히어런트 수신기의 열화 혹은 에이징에 의한 성능 저

www.dbpia.co.kr

하를 보상할 수 있을 것으로 보인다.

References

[1] K. Kikuchi, *Coherent Optical Communications*, Springer, 2010.

[2] H. Bang and C. Park, "OFDMA-PON MAC Technology for next generation optical subscribers," *KICS Inf. & Commun. Mag.*, vol. 30, no. 7, pp. 18-25, Jul. 2013.

[3] R. S. Fyath and Mustafa A. B. Al-Qadi, "Investigation of I/Q imbalance in coherent optical OFDM system," *World Academy of Sci., Eng. Technol.*, vol. 5, no. 12, pp. 1785-1790, 2011.

[4] H. Park, S. Jung, D. Han, and S. Han, "Analysis of low computational complexity DSP algorithm for phase noise compensation in coherent optical communication systems," *J. KICS*, vol. 39C, no. 5, pp. 413-417, May 2014.

[5] E. Ip, A. P. T. Lau, D. J. Barros, and J. M. Kahn, "Coherent detection in optical fiber systems," *Optical Express.*, vol. 16, pp. 753-791, 2008.

[6] W. Shieh and I. Djordjevic, *OFDM for optical communications*, Elsevier, 2010.

[7] N. Kim, J. Park, S. Lee, M. C. Ju, and Y. Park, "Compensation of I/Q amplitude imbalance in coherent PON," *KICS Summer Conf.*, Jeju Island, Korea, Jun. 2015.

[8] E. Ip and J. M. Kahn, "Digital equalization of chromatic dispersion and polarization mode dispersion," *J. Lightw. Technol.*, vol. 25, pp. 2033-2043, 2007.

김 나 영 (Nayeong Kim)

2014년 : 국민대학교 공학사
2014년~현재 : 국민대학교 대학원 전자공학과 석사과정
<관심분야> 광통신시스템, 광대역 통합망, 가시광통신

이 승 우 (Seungwoo Lee)

2014년 : 국민대학교 공학사
2014년~현재 : 국민대학교 대학원 전자공학과 석사과정
<관심분야> 가시광통신, 이동통신, 무선네트워크, 양방향 통신

박 영 일 (Youngil Park)

1987년 : 서울대학교 공학사
1989년 : 서울대학교 공학석사
1995년 : Texas A&M Univ. 공학박사
1995년~1999년 : KT 연구개발본부 선임연구원
1999년~현재 : 국민대학교 전자공학부 교수
<관심분야> 광통신시스템, 광대역 통합망, 가시광통신

www.dbpia.co.kr