

## 부분적인 feed forward 제어 알고리즘을 사용한 고차 PMD 보상에 대한 연구

김나영 · 박남규<sup>†</sup>

서울대학교 전기·컴퓨터공학부

Ⓣ 151-742 서울시 관악구 신림동 산 56-1번지

(2002년 10월 4일 받음, 2002년 12월 30일 수정본 받음)

본 논문에서는 고차 편광모드분산(PMD: polarization-mode dispersion)을 효과적으로 보상하기 위한 방법으로, DOP (degree of polarization)를 1차 PMD 보상을 위한 피드백 신호와 고차 PMD 보상을 위한 feed forward 신호로 사용하는 알고리즘을 제안하였다. 1차 보상이 끝난 후의 DOP 값이 남아있는 고차 PMD의 정도를 나타내는 척도로써 인식하여 고차 PMD를 보상하는 시스템이 되겠다. 이러한 시스템은 고차 보상의 자유도를 1차 보상의 자유도로 제한하기 때문에 안정적이고 비교적 간단하게 구성할 수 있다는 장점이 있다. 제안된 알고리즘의 성능을 분석하기 위하여 10Gbps NRZ 시스템의 전송 모의 실험을 수행하였으며, 그 결과 시스템 다운 시간인 outage probability가 약 세 배 가량 감소되는 것을 확인하였다.

주제어 : PMD, PMD compensation, optical communications, DOP.

### I. 서 론

근래에 광통신 시스템의 채널당 전송 속도가 수십 Gbps 이상으로 증가됨에 따라서 polarization mode dispersion(PMD: 편광모드분산)은 중요한 문제점으로 부상하였다.<sup>[1,2]</sup> PMD로 인한 광전송 시스템의 품질 저하 원인으로는 principal states of polarization(PSP)간의 속도 차이를 발생시켜서 inter-symbol interference(ISI)를 유발하여 전송 품질을 저하시키는 1차 성분과 더불어, 수신단에서 광신호의 모양을 왜곡시키는 고차 성분을 들 수 있다. 특히 전송 속도가 빠른 시스템에서 고차 PMD로 인한 신호 왜곡과 비트 오류의 증가에 대한 관심은 최근 들어 더욱 증가하였다.

이러한 문제점들을 극복하기 위한 여러 방안들이 불과 몇 년 사이에 상당히 다양한 접근 방식을 가지고 제안되었다. 이 중, 특히 전광 시스템 내에서 PMD 문제를 극복하기 위한 방안으로는 왜곡된 광신호를 추출하여 이 신호를 PMD를 보상하기 위한 피드백 구조의 입력 신호로 사용하여 확률적으로 변화하는 PMD에 의한 품질 저하를 보상하려는 시도가 대부분이다.<sup>[3-5]</sup> 이 때, 피드백 구조란 전송 라인에서 광신호가 겪어온 만큼의 PMD 효과를 거꾸로 주기 위한 구조로써 편광조절기와 광지연선로 등으로 구성된 시스템을 말한다. 보통 1차 PMD 성분을 완전히 보상하기 위한 구조에서는 편광조절기 한 개와 가변적 광지연선로 한 개를 필요로 하게 되는데, 한 개의 편광조절기를 조절하기 위해서 일반적으로 두 개의 편광판을 회전시키게 되므로 이러한 1차 PMD 보상은 피드백 신호를 최적화하기 위해 3의 자유도(DOF: degree of freedom)를 가지는 시스템이 되겠다. PMD로 인해 전송 품질이 얼마나 저하되는지를 모니터링할 수 있는 피드백 신호로는 eye opening penalty, DOP, 또 비트 속도의 절반에 해당하는 RF 대역에서

의 파워 등, 여러 가지가 이용되고 있다. 따라서 이 중 하나의 신호를 피드백 신호로 삼아서 이 신호를 통해서 BER을 최소화하는 방향으로 주어진 시스템의 제어 요인들을 적절히 조절하게 되는 것이다.

1차 성분 이외에도 고차 PMD 성분을 보상하고자 한다면 이외에도 편광조절기와 광지연선로가 추가적으로 필요하며 따라서 자유도 역시 비례하여 증가된다. 그러나 자유도가 증가됨에 따라서 이들을 적절히 제어하는 시스템을 구성하기 어려운 현실적인 문제점이 발생하며, 또한 제어해야 하는 성분이 너무 많아서 이들로 인한 최적점이 전 영역에서 단 하나 존재하는 것이 아니라 그 외에도 국소적인 최적점이 다수 존재하기 때문에 이로 인해 국소 최적점에 보상이 도달할 가능성이 많다.<sup>[6]</sup>

본 논문에서는 자유도를 증가시키지 않으면서도 고차 PMD 성분을 어느 정도 보상할 수 있는 알고리즘을 제안한다. 1차 PMD를 보상하기 위해서 DOP(Degree of Polarization)을 피드백 신호로 사용하는 기본적인 PMD 보상을 사용하며, 이때 사용된 DOP를 고차 PMD 성분을 파악하는 feed forward 신호로써 재사용 함으로써 자유도를 그대로 유지하고자 하는 것이다. 이러한 알고리즘을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 검증한 결과, outage probability가 3배 이상 감소한 것을 확인할 수 있었다.

### II. 이론적 배경

일반적으로 PMD를 묘사하는 방법으로 Stokes 평면에서의 3차원 벡터인 PMD 벡터  $\vec{\Omega}(\omega) = \Delta\tau \vec{q}$ 가 많이 사용된다. PMD 벡터란, 광섬유에서 편광상태에 따른 eigen state에 해당하는 것으로써, 주파수에 대한 함수이다.  $\Delta\tau$ 는 이 벡터의 절댓값으로 DGD의 값과 일치하며,  $\vec{q}$ 는 방향을 나타내는 단위 벡터로써 PSP 축 중에서 slow axis를 가리키고 있다.<sup>[7]</sup>

<sup>†</sup>E-mail: nkpark@plaza.snu.ac.kr

PMD 벡터가 주파수에 대한 함수이므로 주파수에 대해 미분하면 PMD 벡터의 2차 성분을 얻게 되며, 흔히  $\Omega(\omega) = \Delta\tau \vec{q} + \Delta\tau \vec{q}_\omega$  로 표현한다.  $\Delta\tau_\omega$ 는 주파수가 변화함에 따라서 DGD의 값이 변화하고 있음을 나타내는 것으로써, 이를 편광유도 색분산(PCD: polarization dependent chromatic dispersion)이라고 한다. 한편,  $\vec{q}_\omega$ 는 PMD 벡터가 주파수 변화에 따라서 그 방향이 변화하고 있음을 나타내는 것으로써, 이를 depolarization rate라고 부른다. PCD는 수식에서도 알 수 있듯이 PMD 벡터의 방향과 일치하고 있으며, depolarization은 PMD 벡터와 직교한다. 그리고 평균적으로 PCD의 값은 depolarization (depolarization rate에 DGD의 값을 곱한 값)의 평균값에 비해 훨씬 적은 것으로 알려져 있다:  $E(\Omega_\omega)^2) = 8/9 E(\Omega_\omega^2)$ .<sup>17)</sup>

PMD의 효과를 Stokes 평면에서 나타내는 방법 이외에도 이를 존스(Jones) 평면에서의 전달 행렬로 표현하는 방법도 있다. 특히 이를 테일러 전개를 통해 1차와 2차 성분만을 나타내는 방법이 있는데 아래의 식으로 표현 가능하다.<sup>14)</sup>

$$M(\omega) = R^{-1}(\omega k) \begin{bmatrix} \exp(i\omega\Delta\tau/2) & 0 \\ 0 & \exp(i\omega\Delta\tau/2) \end{bmatrix} R(\omega k) \quad (1)$$

$R$ 은 unitary 존스 행렬로써 Stokes 평면에서의 축을 중심으로 한 회전의 효과를 나타내고 있는데, 이 때  $4k|\vec{q}_\omega(0)|$ 의 관계를 가짐으로써 주파수에 따라 그 회전의 정도가 달라지는 것을 의미하는 것으로 depolarization의 효과를 설명해주고 있다. 회전 행렬 가운데의 행렬 안의  $\exp(\pm i\omega\Delta\tau/2)$ 는 DGD로 인한 효과를 나타내고 있는 것으로써, 주파수 영역에서의 이와 같은 표현은 시간 축에서의 지연을 의미하는 것이라 하겠다. 이 때, PCD의 효과는 무시하였다.

실제로 광섬유 내에서 광신호가 진행하게 되면서 겪는 PMD 효과는 수많은 모드 커플링 효과를 지나고 난 후이기 때문에 이보다 훨씬 더 복잡한 양상을 띠게 되며, 1차와 2차 이외의 많은 고차의 효과를 포함하고 있으나 가장 큰 효과를 주게 되는 이러한 효과만을 고려하여 PMD 보상기의 전달 행렬을 설정하게 된다. 광섬유를 통과하면서 광신호가 겪은 PMD의 효과를 없애주기 위해서 이러한 전달 행렬의 역행렬을 PMD 보상기의 전달 행렬로 이용하고 이 때  $k$ 와  $\Delta\tau$ 의 적절한 선택을 통하여 PMD 보상의 성능을 개선시킨 예는 이미 발표된 바 있다. Shtaif 등에 의한 분석을 살펴보면, DGD의 값만을 보상하였을 지라도 주파수에 따른 편광 상태가 포앵카레 구 상에서 여전히 한 점에 모여있는 것이 아니라 흩어진 모양을 띠고 있다가, depolarization에 의한 효과를 보상한 이후에는 흩어진 형태가 거의 한 점으로 모이는 것을 알 수 있다(그림 1 참조: 보상전-×, 1차 보상후-○, 2차 보상후-●).<sup>14)</sup> DOP의 정의를 생각하였을 때, 포앵카레 구에서 흩어진 정도가 PMD가 전혀 없는 상태의 한 점으로 모인 상태에서 얼마나 벗어나 있는지를 나타내는 척도로 파악할 수 있을 것이다. 따라서 1차 보상, 즉 DGD의 값을 보정한 이후의 DOP 값으로 잔여 고차 PMD 성분의 양을 짐작할 수 있다 하겠다. 우리는 이 연구에서 이러한 물리적 특성에 착안하여 고차 PMD 성분은

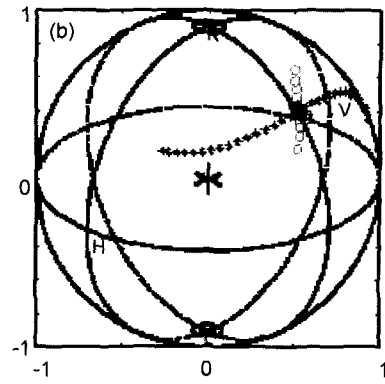


그림 1. 포앵카레 구에서의 분포.

보상하는 알고리즘을 제안할 것이다.

### III. PMD 고차 성분의 확률적 의존성에 대한 기존 연구 분석

최근, PMD의 1차 성분인 DGD와 2차 성분 중에서 1차 성분과 직교하는 depolarization 성분의 상관 관계에 대한 연구가 있었다. 그 중에서 DGD와 depolarization rate의 값이 서로 반비례한다는 연구 결과가 있었는데,<sup>18)</sup> 그 이유는 다음과 같다. 광섬유에서 PMD 현상이 발생되는 원인을 일정한 복굴절 값을 가지는 광섬유의 조각들이 서로 랜덤한 방향성을 가지고 연결되어 있다고 볼 수 있다. 이 때, 이 조각들이 서로 같은 방향성을 가지고 정렬되어 있다면 DGD의 값은 최대가 되지만, 이들 사이에서 모드 커플링이 일어나지 않기 때문에 고차 PMD 성분은 0에 가깝게 된다. 반면에 이 조각들의 방향이 랜덤하여 벡터합이 결국 0으로 된다면 DGD의 값은 0에 가깝지만 이들의 주파수에 대한 변화율을 매우 커지게 된다. 따라서 DGD값과 depolarization rate는 서로 반비례한다는 것이다. 이러한 관계를 수식으로 나타낸다면,  $|\vec{q}_\omega| = A/\Delta\tau$ 와 같은 식이 될 것이다.

이와는 달리 1차 PMD 성분인 DGD값과 1차 PMD와 수직하는 2차 PMD 성분은 서로 비례한다는 연구결과가 있었다.<sup>19)</sup> PSP 축이 주파수에 대해 회전하는 정도를 나타내는 depolarization rate는 DGD 값에 비해서 반비례하는 효과가 있기는 하나 평균적으로는 DGD와 depolarization rate의 곱, 즉 2차 PMD 중에서 1차와 수직하는 성분은 DGD의 값과 비례하여 증가한다는 것이다. 즉 depolarization rate는 상수로 늘 일정한 정도로 존재한다는 의미가 될 것이다. 이러한 관계는  $|\vec{q}_\omega| = B$ 와 같이 나타낼 수 있다.

이들의 결과를 종합한다면,  $|\vec{q}_\omega| = A/\Delta\tau + B$ 와 같이 표현할 수 있을 것이다. 이러한 관계를 통해서 실제로 depolarization rate를 DGD 값으로부터 얼마나 잘 복원할 수 있는지에 대한 시뮬레이션을 수행해 보았다.

그림 2는 전술한 기존의 1차 PMD와 2차 PMD의 상관관계를 실제 고차 PMD 보상기에 적용하였을 때, 실효성을 알아보기 위한 시뮬레이션 셋업이다. 10Gbps NRZ 방식으로 변조된 신호가 1차와 고차 PMD 효과를 발생시키는 PMD 예물체

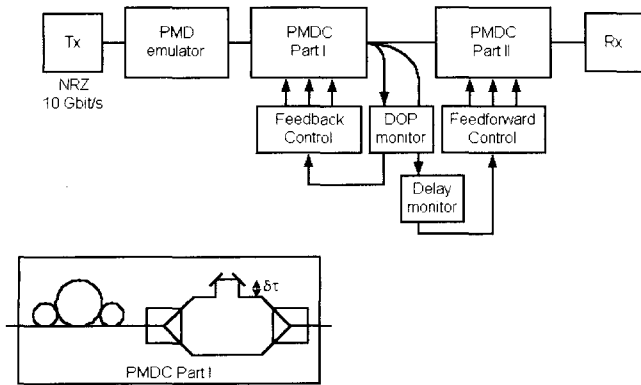


그림 2. 기존 결과 검증을 위한 셋업 구성.

이터를 통해서 PMD 효과를 포함하게 된다. 이 때, PMD 효과에 의해 왜곡된 광신호를 PMDC 파트 I에서 일반적으로 알려진 1차 PMD 보상을 하게 된다. 1차 PMD 보상은 편광 조절기와 가변적인 광지연선으로 이루어져 있으며, 따라서 편광 조절기의 반주기 편광판과 4분주기 편광판의 각도 각각 한 개씩과 광지연선의 길이  $\delta\tau$ 까지 총 3의 degree of freedom (DOF)를 가지고 있는 시스템이 되겠다. PMDC 파트 2에서는 (1)가변 광지연 선로의 길이와 반비례하는 정도의 depolarization을 보상해 주거나, (2)항상 일정한 정도의 depolarization을 보상해주는 시스템을 가정하고 있다. 각각의 경우에 대해서 반비례 계수와 상수의 크기는 평균적으로 BER을 가장 최소화하는 경우를 조사하여 대입하였다. 그림 3은 각각의 비례 상수의 대입에 따라 원하는 2차 PMD 양과 계산된 2차 PMD 양과의 차이를 시각화한 것이다. 그림 3의 (a)의 경우는 반비례하는 상관관계를 대입하였을 때, 각 비례상수에 따라서 그 차이를 나타낸 것이다. 70 km의 SMF와 이에 해당하는 색분산 값을 보상해주는 DCF를 10 km이어서 전송한 경우, 평균 DGD 값은 32psec 정도에 해당하는 페널티를 갖는 전송 시스템을 상정하였을 때 해당되는 시뮬레이션을 수행하였다. 이 때 2차 PMD 성분을 1차 PMD 성분과 반비례한다고 가정하고 그 비례상수를 0에서부터 200까지 변화시켰을 때의 경우를 나타낸 그림이다. 그림(b)에서는 항상 2차 PMD 값이 상수라고 가정하였을 때, 그 상수값을 0에서 10까지 변화시켰을 때, 원하는 시스템의 2차 PMD값과 그 차이가 얼마나 커지게 되는지를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 (a)의 경우에는  $A=97$  정도에서, 그리고 (b)에서는 약 2.9 정도에서 그 오차 값이 최소가 됨을 알 수 있다.

그림 4는 각 경우에 대해 (a) 에뮬레이터 거친 후의 광신호의 BER의 분포, (b) PMDC 파트1, 자유도 3의 PMD 보상을 거친 후의 광신호의 BER 분포, (c) DGD와 반비례하는 depolarization을 적용한 PMDC 파트2까지 거치고 난 후의 BER 분포, (d) DGD와 상관없이 depolarization을 상수로 적용한 PMDC 파트2까지 거치고 난 후의 BER 분포를 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이, 잘못 선정된 2차 PMD 성분의 값으로 인해서 오히려 1차 PMD만을 보상하는 경우보다도 더 BER의 특성이 나빠지는 것을 볼 수 있다. 즉, DGD와 반비례하거나 상수인 depolarization의 값을 대입하는 경우에는 랜

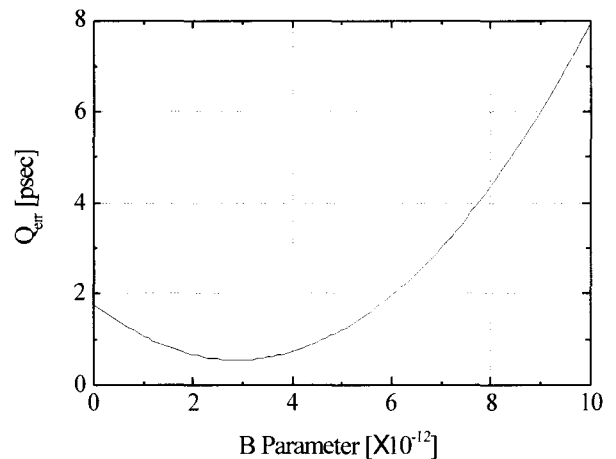
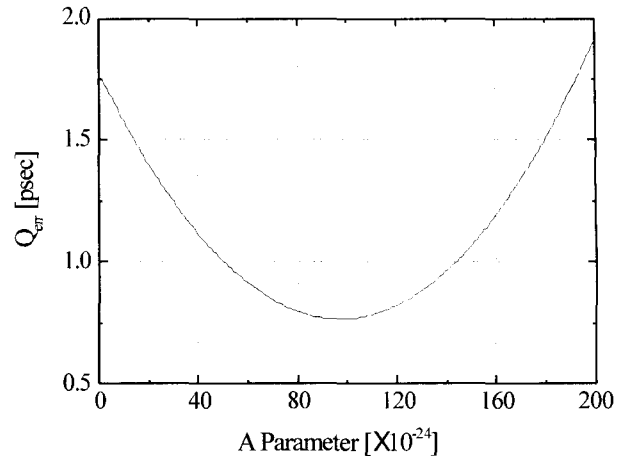


그림 3. 기존 결과를 도입하였을 때, 오차의 차이.

덤하게 변화하는 시스템에 적용하는 데에는 문제가 있다는 것을 확인하였다.

#### IV. 제안 알고리즘

##### 4.1. DOP와 PMD 성분과의 관계

DOP와 PMD 성분 사이의 관계를 고찰하기 위한 간단한 PMD 에뮬레이터를 구성하였다. 고차 PMD 성분은 없고 DGD 값만을 변화시킬 수 있는 1차 PMD 에뮬레이터에서 이 때의 DOP 값과 BER을 시뮬레이션을 통해 측정하였다. 10Gbps NRZ 시스템을 상정하였으며, DGD 값은 0에서 90psec 까지 변화시켜보았다.

이 때 입력 편광 상태에 따라서 어떻게 시스템의 품질이 영향을 받는지 알아보기 위해서 그림 5에서와 같이 14가지 상태의 편광상태를 가지는 경우에 대해서 조사했다. 14가지의 편광상태는 각 극점과 적도, 그리고 타원상태의 편광상태에 따른 변화요인을 알아보기 위해서 포앵카레 구에서 균등하게 분포되도록 선택한 점을 사용하였다.

각 입력 편광상태에 따라서, 1차 PMD 정도에 따라 BER과 DOP가 어떻게 변화하는지를 그림 6에 나타내었다. 입력 편광상태가 Linear한 경우, 즉 한쪽 PSP 쪽으로만 모든 광신호가 들어오는 경우에는 두 PSP 간의 전송 속도의 차이가 무의미

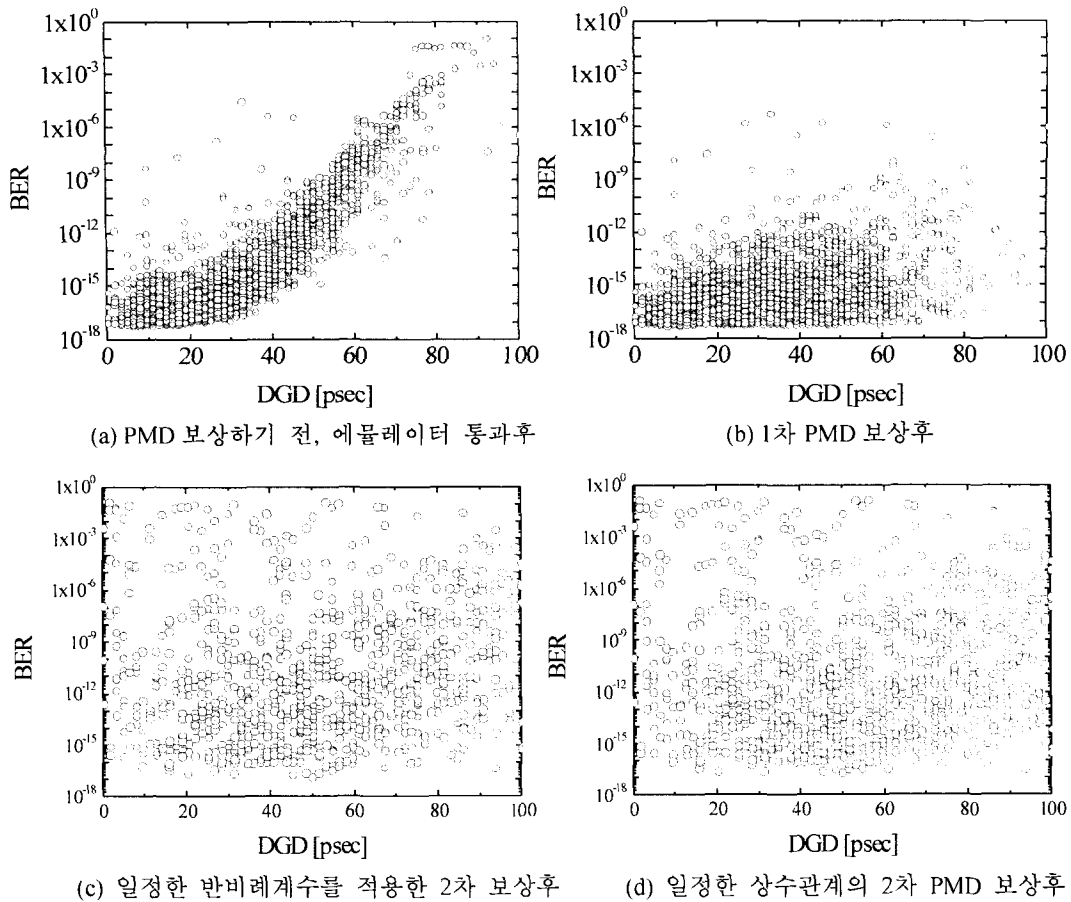


그림 4. 상관관계를 적용한 결과. (a) PMD 보상하기 전, 에뮬레이터 통과후, (b) 1차 보상후, (c) 일정한 반비례계수를 적용한 2차 보상후, (d) 일정한 상수관계의 2차 PMD 보상후.

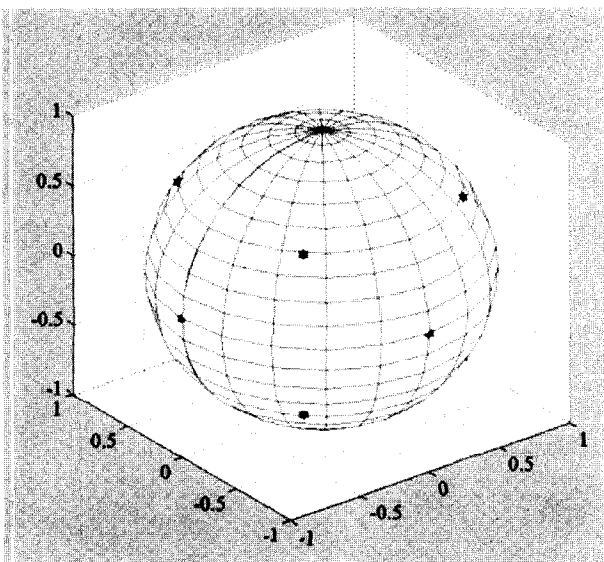


그림 5. 광신호의 다양한 입력 편광 상태.

하크로, 이 경우에는 PMD 효과로 인한 BER의 상승이나 DOP의 저하를 찾아볼 수 없게 된다. 반대로 입력 편광상태가 원형인 경우에는 양쪽으로 E-field가 나누어지는 비율이 1:1로

갈기 때문에 이 경우에 가장 ISI가 크게 발생되며 이로 인한 전송 품질의 감소도 현격하게 된다. 입력 편광상태가 타원인 경우에는 두 가지 극단적인 경우의 중간에 해당하는 품질 저하가 발생된다. 그러나 어떠한 경우에도, 각 입력 편광 상태에 따라서 DGD가 증가할수록 DOP가 감소되는 비율이 BER이 증가되는 비율과 커다란 상관관계가 있음을 보여주고 있다. 이 모델의 경우 고차 PMD는 전혀 발생되지 않고 1차 PMD인 DGD 값만 발생하는 경우이므로 DOP를 피드백 신호로 사용하여 DOP를 최대화하도록 PMD를 보상하게 된다면, 보상 후의 DOP는 원래의 상태인 100%로 완벽하게 돌아온다.

그러면, 1차 PMD 외에도 고차 PMD 성분이 포함되어 있는 경우는 어떠한지 살펴보도록 한다. 그림 7은 DGD와 depolarization 효과만을 발생시키는 에뮬레이터를 가정한 경우의 30, 40, 50psec의 DGD의 경우에 대해서 각각 다른 정도의 2차 PMD를 발생시켰을 때, DOP가 감소하는 정도를 보여주고 있다. 실선은 에뮬레이터를 지난 후의 DOP이고, 점선은 DOP가 3이며 DOP를 피드백 신호로 하여 이를 최대로 만드는 PMD 보상기를 거치고 난 후의 DOP를 보여주고 있다. Depolarization 율이 클수록 DOP의 저하 정도는 증가하게 되며, 그 정도는 DGD의 크기에 의해 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 그림(b)에는 1차 보상 후의 DOP와 100% DOP 사

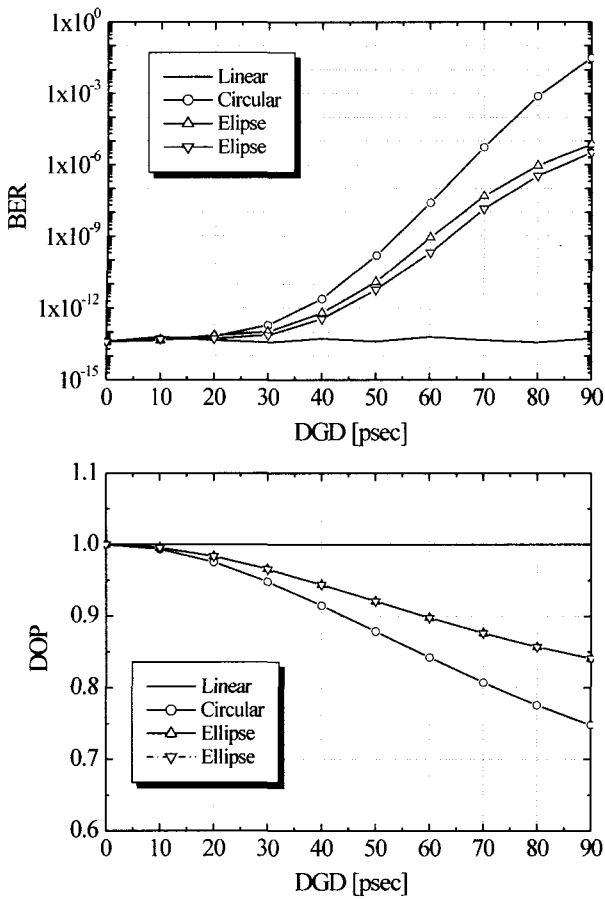


그림 6. 1차 PMD 에블레이터에서 BER과 DOP의 관계.

이의 차이값과 depolarization rate 사이의 관계를 그래프로 나타내었다. 그러나 depolarization rate의 값이 BER과 바로 직결되는 것은 아니다. 그림(c)는 그래서 BER과의 관계를 나타내었다. DGD값이 작고 depolarization 효과도 작은 경우에는 1차 보상만으로 큰 효과를 거둘 수 있으나, 그렇지 않은 경우에는 고차 보상이 반드시 필요함을 알 수 있다. 그리고 고차 보상에 있어 중요한 요인인 depolarization은 1차 보상 후의 DOP값과 직결되어 있다는 사실 또한 알 수 있다.

**4.2. DOP 모니터링을 통해 depolarization rate를 도출하는 알고리즘**

위에서 언급한 여러 가지 요인들을 고려해서 고차 PMD 성분 가운데서 가장 주요한 영향을 미치는 depolarization rate를 계산하기 위한 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 DOP를 피드백 신호로 사용하는 PMD 보상기에서 1차적으로 DGD를 보상하고 난 후의 DOP를 통해서 남아있는 고차 PMD의 효과를 추출하는 것이다.

앞에서 분석하였듯이, 고차 PMD 효과가 1차 PMD인 DGD 효과와 함께 포함되어 있는 경우에는 보상기의 DGD 값을 적절히 조절한다 할지라도, 완전하게 보상되지 못한 고차 PMD 때문에 DOP의 값이 1로 돌아오지 않게 된다. 즉, 광신호가 편광에 의한 효과를 전혀 겪지 않은 상태의 DOP가 1이라고

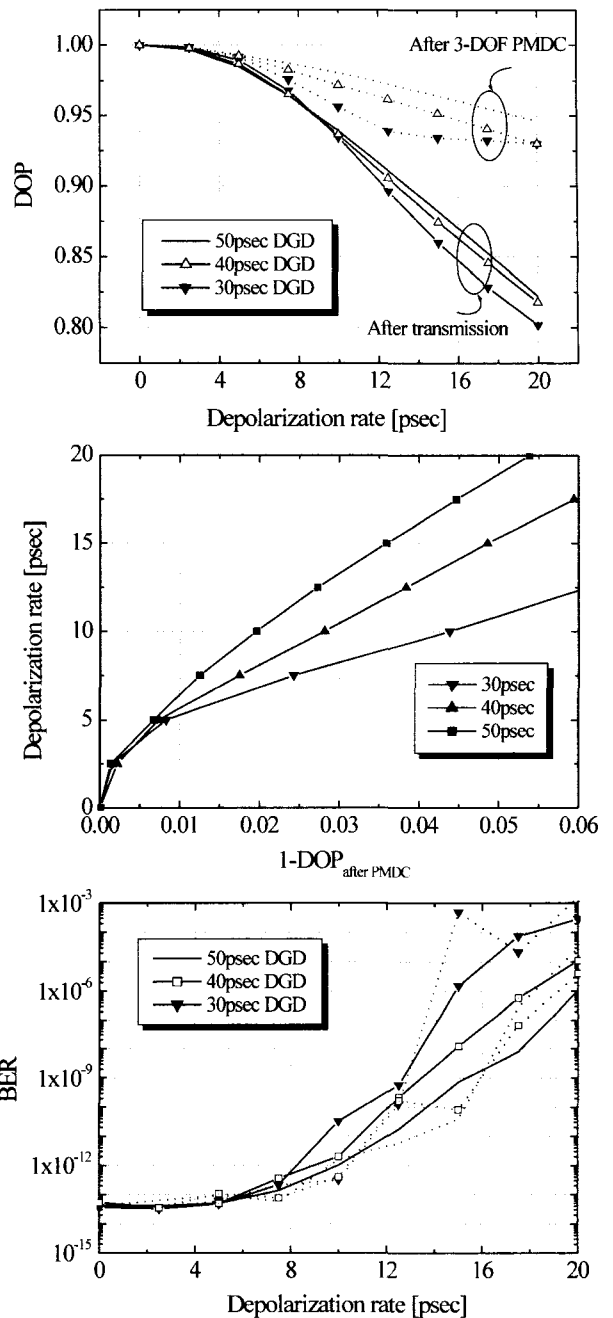


그림 7. 고차 PMD 에블레이터에서 BER과 DOP의 관계.

하였을 때, 1에서 1차 보상 후의 DOP값을 뺀 값은, 남아있는 고차 성분으로 인한 시스템의 저하를 나타내는 것이라 생각할 수 있는 것이다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$|\vec{q}_\omega| = C \times (1 - DOP_1) \tag{2}$$

PMD 보상회로를 간소화하기 위해서 많은 고차 성분 중에서 depolarization rate를 가장 우세한 것으로 가정하였다. PCW와 같은 2차 PMD 성분과 그 외의 3차 이상의 성분은 depolarization에 비해서 무시할만하다고 가정한 것이다. 이때, 이 식에서 depolarization rate와 잔여 PMD로 인해 불완전하게 복구된 DOP 값과의 비례 정도를 나타내는 상수 C를 찾는 것이 필요

하다. 이를 찾기 위해서 root-mean-square 방식을 사용하였으며, 자세한 내용은 다음과 같다.

**4.3. 알고리즘에 사용된 파라미터 계산**

적절한 비례 상수를 찾기 위해서 원하는 목표치와 계산된 값 사이의 에러를 평균적으로 최소화하는 방식을 취하였다. 우선 가장 BER을 작게 하는 depolarization rate를 각 시뮬레이션 경우에 대해서 구하고, 제안된 방식에서 임의의 C 값에 대해서 구해진 depolarization rate를 계산하여 이 둘 사이의 차이를 구하여 평균을 내게 된다. 시뮬레이션에 사용된 시스템은 10Gbps NRZ 시스템으로써, Manakov-PMD 식을 이용하여 전개하였다.<sup>[10]</sup> 이 때 평균 DGD 값은 31psec였으며, 표준편차는 17.5psec였다. 10,000번의 반복적인 시뮬레이션을 통해서 평균값을 구하였다. 알고리즘에 사용될 비례상수를 찾기 위해서 평균을 취할 때에는, DGD의 값이 큰 경우의 오차를 DGD 값이 작은 경우의 오차에 비해서 훨씬 더 가중치를 두어서 DGD가 큰 경우의 오차를 더 작게 하였다. 왜냐하면, depolarization rate는 DGD의 값이 큰 경우에 이 값과 곱해져서 시스템에 작용하기 때문이다. 오차를 구한 식과 이 때 사용된 가중치 함수는 아래와 같다.

$$q_{err}(C) = \sqrt{\langle \left\{ \left| \vec{q}_{\omega_e} - \vec{q}_{\omega_c} \right| / \left| \vec{q}_{\omega_e} \right| \right\}^2 \times W(\Delta\tau) \rangle_{DGD}} \quad (3)$$

$$W(\Delta\tau) = \alpha(\Delta\tau/T)^2 \gamma(1-\gamma) \quad (4)$$

식 (3)의  $\left| \vec{q}_{\omega_e} \right|$  는 depolarization rate를 변화시켜 가면서 가장 BER을 최적화시켜주는 값을 찾아낸 것이고,  $\left| \vec{q}_{\omega_c} \right|$  는 식 (2)의 결과를 통해 계산한 값이다. 적절한 가중치 함수를 찾기 위해서, BER이 depolarization rate에 의해 얼마나 민감하게 변화하는지를 먼저 계산해 보았는데, 이는 각 경우의 DGD 값에 의해서 결정되었다. 가중치 함수는 그래서 DGD에 의한 함수로 식 (4)와 같이 표현된다.

$$S(\Delta\tau) = \frac{\partial BER}{\partial q_{\omega}} \quad (5)$$

식 (5)의 민감도 함수를 구하는 과정은 다음과 같다.

- I 1차 PMD 보상기에서 DOP를 최대화하는 DGD 값을 찾는다.
- II 위에서 정해진 DGD값을 가지고 적절한  $\left| \vec{q}_{\omega} \right|$  값을 찾는다.
- III. 찾은  $\left| \vec{q}_{\omega} \right|$  값에 대해서 BER을 편미분한다.

10,000번의 시뮬레이션 결과 얻어진 민감도 함수를 DGD 값에 의해서 피팅한 결과, 위에서 언급한 (3)의 식에 근사시킬 수 있었는데, 이 값은 1차 PMD에 의한 시스템 패널티에 대한 잘 알려진 함수라 하겠다.<sup>[11]</sup> 이는 depolarization 값이 최종적으로는 DGD 값과 곱해져서 시스템에 품질 저하를 가져오기 때문이다.

이제는 이러한 과정을 거쳐서 계산된 평균 오차의 값을 비례상수 C를 변화시켜가면서 찾아보았다. 그 결과는 그림 8에 나타나있다. 마름모꼴의 그래프가 C를 변화시키면서 찾은 오차의 그래프이다. 참고적으로 비교를 위하여, 상수 B를  $\left| \vec{q}_{\omega} \right| = C \times (1 - DOP_1) + B$  와 같이 도입하였을 때의 결과도 함께 첨부

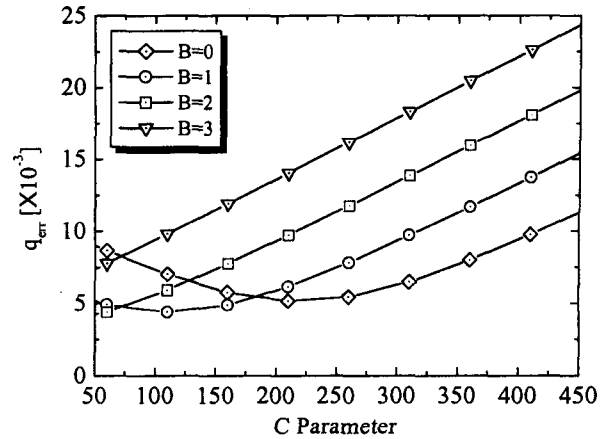


그림 8. C의 선택에 따라 변화하는 오차의 값.

하였다. 그림에서 알 수 있듯이, B에 의한 효과는 경미하며, C의 적절한 선택을 통해서 평균 오차의 값을 줄일 수 있음을 확인하였다.

**V. 시뮬레이션 결과**

적절한 비례상수 C를 대입하여 제안된 알고리즘의 실효성을 시뮬레이션을 통해서 테스트해보았다. 제안된 방법의 강력한 장점은 기존의 1차 PMD인 DGD 값을 주로 보상할 수 있는 자유도-3의 PMD 보상기에 간단한 하드웨어를 추가하며 또한 앞단에서 사용한 피드백 신호인 DOP를 뒷단에서는 feed forward 신호로 사용하게 되어서 더 이상의 자유도의 증가 없이 고차 PMD를 보상할 수 있다는 것이다. 따라서, 시스템을 실제로 구현하는데 있어서 간단할 뿐만 아니라, 지나친 자유도의 증가로 인해 보상기가 국지적인 극점(local sub-optimal point)에 머무르게 되는 문제점을 극복할 수 있다는 점이다. 이러한 시스템을 우리는 부분적 feed forward PMD 보상기라 부르겠다.

시스템 테스트를 위해서 사용된 시뮬레이션 셋업은 기존 결과의 검증용을 위해 사용하였던 셋업인 그림 2와 거의 유사하며, 다만 파트1의 광지연선로의 길이를 사용하지 않는다는 점이 차이점이라 하겠다. 10G bps NRZ 변조 포맷을 사용하였으며, 고차 성분까지 발생 가능한 PMD 에뮬레이터를 통과시켰다. PMDC Part I에서는 일반적인 검증된 자유도-3의 1차 보상기가 적용되었다. 이 때 피드백 신호로 DOP가 사용되었고, 따라서 이 신호가 뒷단의 PMDC Part II의 입력 신호로 재사용되게 된다. 뒷단의 보상기에서는 depolarization rate를 적절하게 주기 위한 회로로 구성되게 된다. 이렇게 각 단의 PMD 보상기를 통과한 후 광신호의 BER을 측정하였다. BER은 Q-신호를 검출하여 이로부터 도출하였으며, 이 때에, 각 비트의 패턴에 의한 의존성이 모두 고려되었다.

시뮬레이션의 결과는 그림 9에 나타나있다. (a)는 에뮬레이터 후, (b)는 1차 PMD 보상기 후, (c)는 부분적 feed forward PMD 보상기까지 거친 후의 BER 히스토그램의 분포를 보여준다. PMD에 의한 전송 품질 저하의 정도를 나타내는 중요

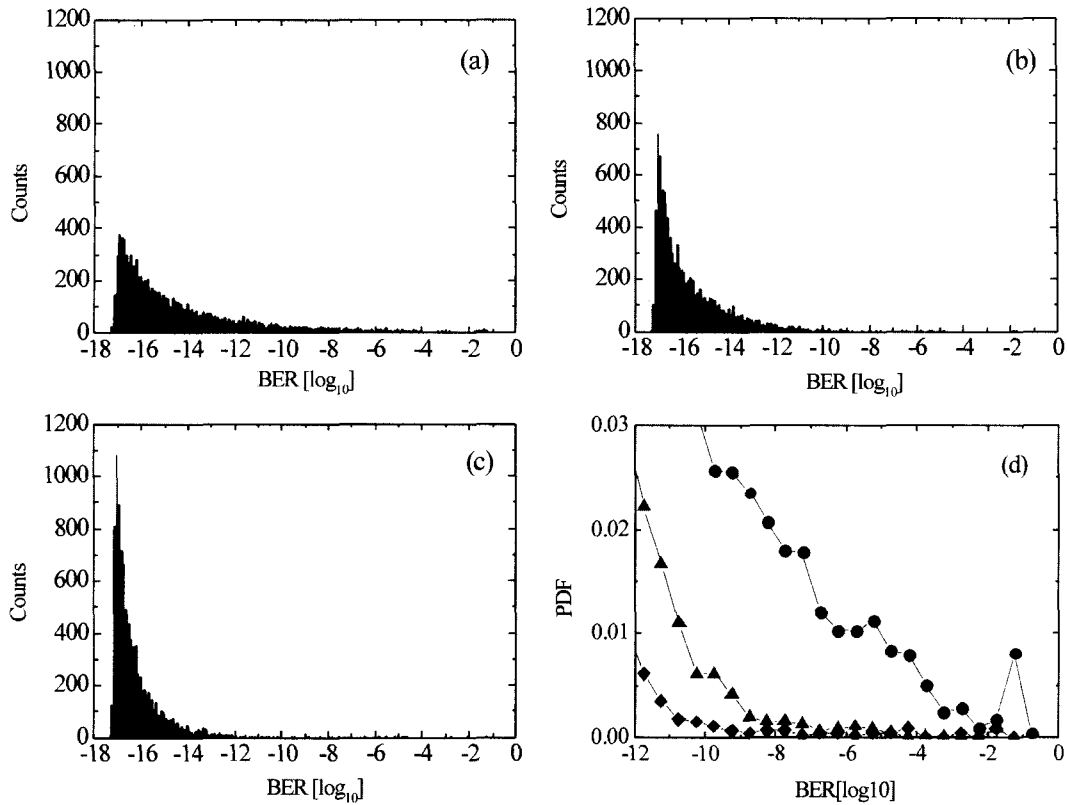


그림 9. (a) 에뮬레이터 후, (b) 1차 PMD 보상기 후, (c) 부분적 feed forward PMD 보상기까지 거친 후의 BER 히스토그램의 분포, (d) 각 경우의 PDF 중에서 BER이  $10^{-12}$  이하인 경우(Outage probability)를 확대한 그림.

한 파라미터인 outage probability를 보여주기 위해서 BER이  $10^{-12}$  보다 큰 경우에 대해서 PDF를 확대하여 그렸다.

1차 PMD 보상의 결과로 BER 히스토그램이 상당히 낮은 BER쪽으로 이동한 것을 알 수 있으며, 제안된 알고리즘을 적용하여 고차 PMD 보상을 한 후에는 더욱 더 BER의 분포가 낮은 쪽으로 이동하였으며, 특히 BER이 높은 쪽이 많이 감소한 것을 알 수 있다. 그림(d)에 나타나 있듯이 상당한 정도의 outage probability가 줄어들었다. 이는  $10^{-0.75}$ 에서  $10^{-1.99}$ 로 감소한 것으로써 1차 보상만 한 경우에 비해서 약 세 배 정도의 시스템 다운 시간이 감소한 것으로 생각할 수 있다.

### VI. 결 론

본 논문에서는 1차 PMD 보상을 위해서 피드백 신호로 사용된 DOP를 다시 이용하여 고차 PMD를 자유도의 증가 없이 보상하는 알고리즘에 대해 제안하며, 그 실효성을 시뮬레이션을 통해 검증하였다. DOP 값은 PMD 현상이 광선로 내에 존재하지 않는다면 100%로 유지되어야 하겠지만, 1차와 그 외의 고차 PMD의 영향으로 인해 더 작은 값으로 감소하게 된다. 따라서 1차 PMD 보상후의 DOP 값은 남아있는 고차 PMD 값으로 인해서 원래의 100%에서 줄어들어 있게 되며, 그 값을 측정하여 고차 보상기에 feed forward 방식으로 재사용하는 것이다. 시뮬레이션 결과 고차 PMD 보상기를 1차 보상기 뒤에 덧붙임으로써 약 세 배 가량의 시스템 outage

probability를 감소시키는 결과를 얻을 수 있었다.

따라서, 이를 실제 시스템에 적용함으로써 고차 보상을 통해서 시스템의 성능을 얻을 수 있으며 추가적인 자유도의 증가가 없기 때문에 국지적인 극소점에서 동작할 가능성이 많은 여타의 고차 PMD 보상기에 비해 안정적인 동작이 가능하리라 여겨진다.

### 참고문헌

- [1] C. D. Poole *et al.* "Polarization effects in lightwave systems," in *Optical Fiber Telecommunications IIIA*, I. P. Kaminov and T. L. Koch, San Diego, CA; Academic Press, 1997, ch6.
- [2] N. Y. Kim *et al.* "Limitation of PMD compensation due to polarization dependent loss in high speed optical transmission link," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, pp. 104-106, 2002.
- [3] F. Roy *et al.* "A simple dynamic polarization mode dispersion compensator," in *Proc. OFC'99, Tech. Dig.*, pp. 275-278, 1999.
- [4] M. Shtaif, *et al.* "A compensator for the effects of high-order polarization mode dispersion in optical fibers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 12, pp. 434-436, 2000.
- [5] N. Y. Kim *et al.* "Second order PMD compensation using correlation factor between degree of polarization and depolarization rate," in *Proc. OFC2002, Tech. Dig.*, 2002, paper

- WI6.
- [6] H. Sunnerud *et al.* "A comparison between different PMD compensation techniques," *J. Lightwave Technol.*, vol. 20, pp. 368-378, 2002.
- [7] G. J. Foschini *et al.* "The statistics of PMD-induced chromatic fiber dispersion," *J. Lightwave Technol.*, vol. 17, pp. 1560-1565, 1999.
- [8] L. E. Nelson *et al.* "Measurement of depolarization and scaling associated with second-order polarization mode dispersion in optical fibers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, pp. 1614-1616, 1999.
- [9] G. Shtengel *et al.* "Statistical dependence between first and second-order PMD," in Proc. OFC2001, Tech. Dig., 2001, paper MO3.
- [10] D. Marcuse *et al.* "Application of the mamakov-PMD equation to studies of signal propagation in optical fibers with randomly varying birefringence," *J. Lightwave Technol.*, vol. 15, pp. 1735-1746, 1997.

### Higher-order PMD compensator using partially feed forward algorithm

Na Young Kim and Namkyoo Park<sup>†</sup>

*School of Electrical Engineering and Computer Science,  
Seoul National University, Seoul 151-742, KOREA*

<sup>†</sup>*E-mail: nkpark@plaza.snu.ac.kr*

(Received October 4, 2002, Revised manuscript December 30, 2002)

We proposed a noble algorithm using DOP (degree of polarization) not only as feedback signal but also as feed-forward signal for the compensation of higher-order PMD effect. In the proposed algorithm, DOP after the first-order PMD compensation is considered as the indicator of the amount of residual higher-order PMD. This algorithm has the merit that DOF (degree of freedom) of the system can be limited to the level of the first-order PMD compensation system. Owing to the limited DOF, the reliability of the system can be enhanced and the complexity of the implementation can be degraded. For the analysis of the algorithm, we simulated the 10Gbps NRZ transmission system and obtained the result that the system outage probability can be reduced as much as three times with respect to the only first-order PMD compensation case.

*Classification code* : OC.010.