(19)대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(51) 。Int. Cl.[7]
G02B 6/00

(11) 공개번호 10-2004-0045487
(43) 공개일자 2004년06월01일

(21) 출원번호 10-2004-7005062
(22) 출원일자 2004년04월06일
번역문 제출일자 2004년04월06일
(86) 국제출원번호 PCT/US2002/031797
(87) 국제공개번호 WO 2003/030378
(86) 국제출원출원일자 2002년10월04일
(87) 국제공개일자 2003년04월10일

(30) 우선권주장 60/327,150 2001년10월04일 미국(US)

(71) 출원인 메사추세츠 인스티튜트 오브 테크놀로지
미국 02139 메사추세츠 캠브리지 메사추세츠 애브뉴 77

(72) 발명자 푸아포분
미국메사추세츠주02139캠브리지아파트먼트케이-3바싸스트리트278

피니존엠
미국메사추세츠주02142캠브리지#104암허스트스트리트70

(74) 대리인 김성기

심사청구 : 없음

(54) 실시간 편광 모드 분산의 특징화 방법 및 시스템

요약

1차 편광 모드 분산과 2차 편광 모드 분산을 가지는 광학 매체(예컨대, 광섬유)에 있어서, 광신호 대역폭의 함수로서 광학 매체에서의 광신호의 측정된 평균 편광 상태의 변화와 편광 모드 분산간의 관계는 예측 가능하다. 따라서, 1차 편광과 2차 편광은 가변 신호 대역폭과 함께 광신호에 대한 일련의 평균 편광 상태를 측정함으로써 결정될 수 있다.

대표도

도 1

명세서

기술분야

본 발명은 일반적으로 섬유 광학에 관한 것으로서, 특히 섬유 광전송 시스템에서 편광 모드 분산을 특징화하는 방법에 관한 것이다.

배경기술

편광 모드 분산(PMD: Polarization Mode Dispersion)은 일반적으로 편광된 광신호가 싱글 모드 광섬유와 같은 광전송 시스템을 따라 흐를 때 생기는 시간 지연의 변화를 일컫는 것이다. 광섬유에서 편광 모드 분산(PMD)이 생기는 이유는 광섬유의 코어가 비대칭[예컨대, 광섬유의 제조시에 생성되는 코어의 타원화(core ellipticity)와 취급시에 생기거나 설치시에 형성되는 휨 스트레스(bending stress)]이기 때문이다. 광섬유의 코어가 비대칭이면 광섬유를 통해서 전파하고 있는 광신호의 편광 상태(SOP: State Of Polarization)가 무작위로 변하게 한다. 상이한 편광 상태(SOP)들이 상이한 상대 속도[예컨대, 일부 편광 상태(SOP)는 고속으로 전송되고 일부 편광 상태(SOP)는 저속으로 전송됨]로 광섬유 코어를 통해서 전파하고, 그 결과, 입력 광신호에 비해서 전송 광신호의 펄스폭이 왜곡되게 된다. 또한, 코어가 비대칭이면 환경의 변동, 예컨대 광섬유의 온도 또는 움직임에 매우 민감하고, 이러한 환경 변동은 밀리초 단위로 고속 발생하며 시변(時變)하는 전송 광신호 펄스폭 왜곡이 생기게 한다.

1차 편광 모드 분산(PMD)은 직교편광된 2 개의 주 편광 상태(PSP' Principal States of Polarization)간의 시간 지연을 일컫는다. 주 편광 상태(PSP)는 각 편광 상태(SOP)를 설명해주고 특징화하며, 광섬유 안에서의 편광 모드 분산(PMD)의 영향을 평가하는 편리한 기본 세트를 형성한다. 주 편광 상태(PSP)를 기본 세트로서 사용하면, 광섬유를 통해서 전파하는 각 편광 상태(SOP)는 직교편광된 2 개의 주 편광 상태(PSP)의 선형 조합으로 표현된다. 가변하는 편광 상태(SOP) 펄스폭 왜곡은 주 편광 상태(PSP)들간에 변하는 지연의 함수이다. 이론적으로는, 각 주 편광 상태(PSP)는 광섬유를 통과하는 비행시간차[통상, 차등 군속도 지연(DGD: Differential Group Delay)이라고 알려짐]를 경험하게 되고, 그 결과, 광섬유의 출력부에서 2 개의 주 편광 상태(PSP)사이에 시간 지연이 생기게 된다. 출력측의 편광 상태(SOP)는 서로에 대해서 시간 지연되는 2 개의 주 편광 상태(PSP)의 선형 조합으로 표현된다. 이들 주 편광 상태(PSP)간의 시간 지연이 더욱 커진다는 것은 입력측 편광 상태(SOP) 펄스폭과 출력측 편광 상태(SOP) 펄스폭간의 상대적인 차가 더욱 커지는 것에 상응한다.

광섬유는 2 개의 주 편광 상태(PSP) 사이에 0.1 ps/(㎞) $^{1/2}$ 정도로 차등 군속도 지연(DGD)을 가진다. 오래된 광케이블, 예컨대 지상 네트워크에 사용된 케이블의 경우, 차등 군속도 지연(DGD)은 0.1 ps/(㎞) $^{1/2}$ 정도이며, 불과 수백 킬로미터의 전송 거리에 약 50 피코초의 시간 지연이 생기게 된다.

2차 편광 모드 분산(PMD)은 1차 편광 모드 분산(PMD)의 주파수 의존(종속)형이라고 일컫는다. 2차 편광 모드 분산(PMD)은 광섬유에서의 색분산에 관련되어 있고, 이 색분산은 광섬유의 굴절율의 주파수 의존(종속)성 때문에 생긴다. 2차 편광 모드 분산(PMD)은 주 편광 상태(PSP)들의 분산을 일으키며, 이 분산은 광섬유에서 전파하는 광신호를 더 왜곡시킨다.

고속 광데이터 전송에 대한 요구(예컨대, 초당 기가비트에서 초당 테라비트로)가 증가함에 따라서, 편광 모드 분산(PMD)에 의한 광펄스폭 왜곡은 데이터 전송 레이트를 제한하는 요인 중 하나가 될 수 있다.

발명의 상세한 설명

1차 편광 모드 분산(PMD)과 2차 편광 모드 분산(PMD)을 가지는 광학 매체(예컨대, 광섬유)에서, 신호 대역폭의 함수로서 편광 모드 분산(PMD)과, 광학 매체에서의 광신호의 측정된 평균 편광 상태(SOP)간의 예측 가능한 관계가 존재한다. 따라서, 1차 편광 모드 분산(PMD)와 2차 편광 모드 분산(PMD)은 가변하는 신호 대역폭에 대한 일련의 평균 편광 상태(SOP)를 측정함으로써 결정된다. 신호 대역폭은 특정 주파수에 대해서 대칭적으로 또는 비대칭적으로 변화될 수 있다.

한 형태에 있어서, 광학 매체에서 편광 모드 분산을 측징짓는 방법은 복수 개의 스펙트럼(각 스펙트럼은 그 복수 개의 스펙트럼 중 기타의 스펙트럼과는 주파수 대역폭이 다름)의 각 스펙트럼마다 광학 매체에서의 광신호의 평균 편광 상태 벡터를 측정하는 단계를 포함한다. 이 방법은 평균 편광 상태 벡터와 주파수 대역폭으로부터 편광 모드 분산이 특징을 결정하는 단계를 포함한다.

이 방법의 실시예에서는 다음의 특성들 중 하나 이상이 포함될 수 있다.

상기 복수 개의 스펙트럼 중 적어도 일부 스펙트럼은 미리 정의된 주파수에 대해서 대칭적인 대역폭을 가진다. 대안으로, 또는 부가적으로, 상기 복수 개의 스펙트럼 중 적어도 일부의 스펙트럼은 미리 정의된 주파수에 대해서 비대칭적인 대역폭을 가진다.

일부 실시예에 있어서, 상기 방법은 복수 개의 스펙트럼의 각 스펙트럼마다 특정된 평균 편광 상태 벡터로부터 2차 편광 상태 벡터(2차 편광 상태 벡터들의 각각은 미리 정의된 주파수에 대해서 대칭적인 대역폭을 가짐)를 결정하는 단계를 더 포함한다. 대안으로, 또는 부가적으로, 상기 방법은 복수 개의 스펙트럼의 각 스펙트럼마다 측정된 평균 편광 상태 벡터로부터 추가의 편광 상태 벡터(이 추가의 편광 상태 벡터들의 각각은 미리 정의된 주파수에 대해서 비대칭적인 대역폭을 가짐)를 결정하는 단계를 더 포함한다.

광신호의 평균 편광 상태 벡터를 측정하는 단계는 광신호로부터 테스트 광신호를 얻는 단계와, 그 테스트 광신호를 광학적으로 필터링하는 단계와, 그 광학적으로 필터링된 테스트 광신호의 평균 편광 상태 벡터를 측정하는 단계를 포함할 수 있다. 테스트 광신호를 광학적으로 필터링하는 단계는 복수 개의 대역통과 필터의 각 대역통과 필터를 통해서 상기 테스트 광신호를 순차적으로 지도(direct)하는 단계와, 각 대역통과 필터마다 평균 편광 상태 벡터를 측정하는 단계를 포함할 수 있다. 평균 편광 상태 벡터의 주파수 스펙트럼은 대역통과 필터에 관련지어질 수 있다.

편광 모드 분산의 특징을 결정하는 단계는 미리 정의된 주파수에서의 편광 상태로부터 평균 편광 상태 벡터의 섭동(perturbation)과, 상이한 스펙트럼들의 대역폭들에 관련지어진 파라미터를 측정하는 단계를 포함할 수 있다. 편광 모드 분산의 특징은 1차 편광 모드 분산의 측정치 및/또는 2차 편광 모드 분산의 측정치(예컨대, 1차 편광 모드 분산 또는 2차 편광 모드 분산을 특징짓는 4 개의 성분 벡터)를 포함할 수 있다. 편광 모드 분산의 특징은 실시간으로 측정될 수 있다.

상기 방법은 복수 개의 광학 매체에서 편광 모드 분산을 특징화하는 데 사용될 수 있다. 예컨대, 이 광학 매체는 광섬유, 복굴절 크리스탈, 광 폴리머, 또는 액정이 될 수 있다. 다른 예로는 광하걱 지연 라인이 있다.

편광 모드 분산의 특징을 결정하는 단계는 뽀앙까레 구면(Poincare sphere)에서의 평균 편광 상태의 궤적을 주파수 대역폭의 함수로서 결정하는 단계를 포함할 수 있다.

다른 형태에 있어서, 광학 시스템은 편광계에 대한 광학적 테스트 신호의 전송 대역폭을 가변적으로 필터링하는 가변 광학 필터와, 상기 가변적으로 필터링된 광학적 테스트 신호를 수신하고 각 전송 대역폭마다 광학적 테스트 신호의 평균 편광 상태를 측정하도록 구성된 편광계를 포함한다. 이 광학 시스템은 또한, 상기 평균 편광 상태와 상기 가변적으로 필터링된 광학적 테스트 신호의 전송 대역폭에 기초하여 광 입력 신호의 1차 편광 모드 분산 파라미터와 2차 편광 모드 분산 파라미터를 결정하도록 구성된 제어기도 포함한다. 이 광학 시스템은 편광 모드 분산을 특징짓는 방법을 구현하도록 구성될 수 있다.

또 다른 형태에 있어서, 광학 시스템은 제1 위치와 제2 위치 사이에 광신호를 전송하도록 구성된 광섬유와, 상기 광신호로부터 유도된 광학적 테스트 신호를 수신하고 광 입력 신호의 상이한 전송 대역폭들에 대해서 평균 편광 상태를 측정하도록 구성된 편광계와, 상기 편광계와 통신하고 평균 편광 상태와 광학적 테스트 신호의 전송 대역폭에 기초하여 광신호의 1차 편광 모드 분산 파라미터와 2차 편광 모드 분산 파라미터를 결정하도록 구성된 제어기를 포함할 수 있다.

광학 시스템의 실시예는 다음의 특성들 중 하나 이상을 포함할 수 있다. 광학 시스템은 광신호를 제1 위치에서 제2 위치로 전송하도록 구성된 광섬유를 더 포함하되, 광학적 테스트 신호는 광신호로부터 유도된다. 광학 시스템은 또한, 보상된 출력 광신호를 생성하기 위해서 1차 편광 모드 분산 파라미터와 2차 편광 모드 분산 파라미터에 기초하여 광신호를 보상하도록 구성된 보상기도 포함할 수 있다. 광신호는 피드포워드 모드(feed-forward mode)에서 보상될 수 있다. 수신기는 제2 위치에서 상기 보상된 출력 광신호를 검출하도록 구성될 수 있다. 송신기는 제1 위치에서 광신호를 광섬유로 출발(launching)시키도록 구성될 수 있다. 송신기는 편광 스크램블러를 포함할 수 있다.

광학 시스템은 광신호로부터 광학적 테스트 신호를 유도하는 탭을 포함할 수 있다. 탭은 제2 위치 부근에서 광섬유에 결합될 수 있고, 광학적 테스트 신호를, 가변 광학 필터와 편광계에 결합된 도파관 안으로 지도할 수 있다. 광학적 테스트 신호의 1차 편광 모드 분산 파라미터와 2차 편광 모드 분산 파라미터는 광신호의 1차 편광 모드 분산 파라미터와 2차 편광 모드 분산 파라미터에 관련지어질 수 있 다. 예컨대, 광학적 테스트 신호의 1차 편광 모드 분산 파라미터와 2차 편광 모드 분산 파라미터는 광신호의 1차 편광 모드 분산 파라미터와 2차 편광 모드 분산 파라미터와 동일할 수 있다.

상기 방법 또는 광학 시스템의 실시예는 다음의 이점들 중 하나 이상을 포함할 수 있다. 상기 방법은 1차 편광 모드 분산(PMD) 실시간과 2차 편광 모드 분산(PMD) 실시간을 특징화할 수 있고, 피드포워드 포드로 구현될 수 있다. 일부 실시예에서, 상기 방법은 1차 편광 모드 분산(PMD)과 2차 편광 모드 분산(PMD)을 평가하여 작용을 시작할 피드백 편광 모드 분산(PMD)의 개시점을 설정하는 데 사용될 수 있다. 상기 방법은 모니터링되고 있는 광통신 채널의 동작을 방해하지 않고서도 구현될 수 있다. 상기 방법은 기존의 전기통신 시스템에서 쉽게 구현될 수 있으며, 상기 방법을 구현하는 장치는 섬유 광학 시스템의 수신기 단부에 설치될 수 있으며, 또한 시스템에 이미 있는 구성 요소를 이용할 수 있다. 상기 기술들에 의해서, 비교적 큰 대역폭(5 ㎓ 또는 그 이상과 같이 예컨대, 1 ㎓보다 큰 대역폭)에 걸쳐서 평균화된 광신호의 편광 상태(SOP)를 측정하기 때문에, 측정은 고속 및 큰 신호 대 잡음 비로 행해질 수 있다. 여기에서 개시된 기술은 다른 광 구성요소(예컨대, 복굴절 구성요소)의 광학적 성질을 특징화하는 데 사용될 수 있다.

다른 경우에 정의되지 않으면, 본 명세서에 사용되는 기술 용어 및 과학 용어는 당업자가 공통으로 이해할 수 있는 것과 동일한 의미를 말한다. 본 명세서에 언급한 모든 출판물, 특허 출원, 특허 및 다른 참조문은 전체가 참고로 합체되어 있다. 충돌이 있는 경우에는 본 명세서는 정의를 포함하여 조절할 것이다. 추가로, 장치, 방법 및 예는 예시에 불과

하고 한정하는 것으로 의도되는 것은 아니다.

본 발명의 다른 특징 및 이점은 다음의 상세한 설명 및 특허청구범위로부터 명확해질 것이다.

도면의 간단한 설명

도 1은 섬유 광학 시스템에서 편광 모드 분산(PMD)을 특징화하는 구성요소를 포함하는 섬유 광학 시스템의 개략도이다.

도 2는 뽀앙까레 구면의 개략도이다.

도 3의 (a) 내지 (d)는 편광 상태(SOP) 측정값의 움직임을, 무시할 수 있을 정도의 2차 편광 모드 분산(PMD)을 갖는 시스템에 대한 대칭 확장 대역폭 함수로서 나타내는 뽀앙까레 구면의 개략도이다.

도 4의 (a) 및 (b)는 주 편광 상태(PSP)에 수직한 뽀앙까레 구면 중 일부를 도시하는 개략도로서, ω_0 에 관하여 각각 대칭 및 비대칭으로 확장하는 대역폭에 대해서 평균 편광 상태(SOP)의 궤적을 도시하고 있다.

도 5는 벡터 $\vec{T}(\omega_0)=\vec{M}_1-\vec{M}_2$ 을 나타내는 주 편광 상태(PSP)에 수직한 뽀앙까레 구면의 일부를 도시하는 개략도이다.

도 6의 (a)는 주파수 ω_a 와 주파수 ω_b 간의 평균 편광 상태(SOP)를 측정하는데 사용되는 일련의 광학 필터의 주파수 함수로서 정규화된 전송을 도시하는 도면이다.

도 6의 (b)는 도 6의 (a)의 광학 필터를 이용하여 얻은 편광 상태(SOP)들에 대한 평균 편광 상태(SOP)의 궤적을 도시하는 주 편광 상태(PSP)에 수직인 뽀앙까레 구면의 일부의 개략도이다.

여러 도면들에서 동일한 참조 부호는 동일한 요소를 나타낸다.

실시예

도 1을 참조하면, 섬유 광학 시스템(100)은 송신기(110), 광섬유(120) 및 수신기(130)를 포함한다. 동작 중에, 송신기(110)는 편광된 광 입력 신호를 광섬유(120)의 일측 단부에 출발시킨다. 송신기(110)는 광원, 예컨대 레이저 다이오드를 포함한다. 옵션으로, 송신기(110)는 편광 스크램블러를 포함할 수 있고, 이 편광 스크램블러는 광 입력 신호를 광섬유(120)에 결합시키기 이전에 광 입력 신호의 편광 상태를 무작위로 변화시킨다. 광섬유(120)는 광신호를, 수신기(130)에 의해서 수신되는 광섬유의 반대측 단부에 전송한다.

섬유 광학 시스템(100)은 또한, 광섬유(120)를 통해서 전송되는 광시호의 편광 모드 분산(PMD)을 감소시키기 위해서 편광 모드 분산(PMD) 보상기(140)도 포함한다. 편광 모드 분산(PMD) 보상기(140)는 탭(150)에서 광신호로부터 유도되는 테스트 신호의 측정된 편광 모드 분산(PMD)에 기초하여 광신호의 편광 상태를 수정함으로써 광신호의 편광 모드 분산(PMD)을 감소시킨다. 테스트 신호의 편광 상태(SOP)와 편광 모드 분산(PMD)은 예측 가능한 방법으로 광신호의 편광 상태(SOP)와 편광 모드 분산(PMD)에 관련지어진다. 따라서, 테스트 신호의 편광 모드 분산(PMD)을 측정하는 것은 광섬유(120)로부터 나오는 광신호의 편광 모드 분산(PMD) 측정치를 제공하는 것이다. 테스트 신호는 상이한 대역폭의 복수의 필터 를 포함하는 가변 광학 필터(160)를 통과한다. 동작 중에, 가변 광학 필터(160)는상기 복수의 필터의 각 필터로 테스트 신호를 순차적으로 필터링하고, 편광계(170)는 이 필터링된 테스트 신호들의 각각의 평균 편광 상태(SOP)를 측정한다. 편광계(170)는 이 측정된 편광 상태(SOP)로부터 테스트 신호의 편광 모드 분산(PMD)의 특징들 중 하나 이상을 결정하고 실시간으로 광신호의 편광 모드 분산(PMD)를 감소시키기 위해서 편광 모드 분산(PMD) 보상기(140)를 조절하는 프로세서(도시하지 않음)를 포함한다. 편광 모드 분산(PMD) 보상기(140)는 피드포워드 방식으로 작용한다.

일반적으로, 가변 광학 필터(160)는 광학적 테스트 신호의 편광 모드 분산(PMD)을 결정하기 위해서 전송 주파수와 전송 대역포의 적절한 범위를 제공하는 어떤 필터 또는 필터들의 조합일 수 있다. 예컨대, 2 개의 필터를 중첩하도록 광대역 전송 스펙트럼을 겹치도록 배치할 수 있다. 전송 대역의 중심 주파수를 변화시키면 필터쌍에 의해서 전송되는 신호의 대역폭도 변화하게 된다. 다른 예는 여러 개의 패브리-페로(Fabry-Perot) 필터를 제공하는 것으로서, 각 패브리-페로 필터는 상이한 전송 대역을 가지며 독립으로 필터링을 행한다. 일반적으로, 테스트 신호를 필터링하는데 사용되는 전송 대역폭의 범위는 광섬유(120)의 차등 군속도 지연(DGD)에 의존한다. 따라서, 가변 광학 필터(160)는 구현되어 있는 특정 시스템에 대해서 충분한 최대 대역폭 및 대역폭 범위를 제공하도록 선택되어야 한다.

테스트 신호의 편광 모드 분산(PMD)을 결정하기 위해서, 편광계(170)는 가변 광학 필터(160)의 몇 개의 상이한 전송 대역에 대해서 필터링된 테스트 신호의 평 균 편광 상태(SOP)를 측정한다. 편광계에 사용되는 검출기의 유한 응답 시간 때문에, 편광계는 내재적으로 펄스 기간에 걸쳐서 평균화된 편광 상태(SOP)를 측정한다. 균등하게, 주파수 영역에서, 편광계는 전송된 필터링 후의 테스트 신호의 스펙트럼 대역폭에 걸쳐서 편광 상태(SOP)를 평균화한다. 따라서, 측정된 편광 상태(SOP)는 평균화된 편광 상태(SOP)이다.

광섬유(120)의 편광 모드 분산(PMD)을 측정하기 위한 특정 구현예를 설명하기 이전에, 얻어진 데이터로부터 편광 모드 분산(PMD)를 결정하는데 사용되는 수학 공식을 설명하는 것이 유용할 수 있다.

주파수 의존적인 편광 상태(SOP)는 수학식 1의 스토크스(Stokes) 벡터로 정의되며, S_0, S_1, S_2, S_3 은 수학식 2 내지 5와 같다.

수학식 1

$$\vec{S}(\omega) = \begin{pmatrix} S_0 & S_1 & S_2 & S_3 \end{pmatrix}$$

수학식 2

$$S_0 = E_x^2 + E_y^2$$

수학식 3

$$S_1 = E_x^2 - E_y^2$$

수학식 4

$$S_2 = 2E_x E_y \cos(\phi)$$

수학식 5

$$S_3 = 2E_x E_y \sin(\phi)$$

E_x 와 E_y 는 각각 x 성분 전계의 복소 크기와 y 성분 전계의 복소 크기이다. ϕ는 두 크기간의 상대 위상이다.

도 2를 참조하면, 편광 상태(SOP)의 편리하고 직관적인 그래프 표현이 뽀앙까레 구면(200)이다. 파라미터 $s_1(\omega)$, $s_2(\omega)$ 및 $s_3(\omega)$은 $s_i(\omega)=(S_i)/(S_o)$의 관계식으로 표현된다. 여기서, i는 1, 2 또는 3이고 스토크스 파라미터를 3차원 카티시안 좌표계에서 대응하는 x 성분, y 성분 및 z 성분으로 변환하는데 사용된다. 3차원 카티시안 좌표계에서, 뽀앙까레 구면(200)은 있을 수 있는 모든 편광 상태(SOP)를 포함하는 점들의 집합으로 정의된다. 구면의 표면에 있는 점들은 순수하게 편광된 상태를 나타내지만, 구면의 내부에 있는 점들은 부분적으로 편광된 편광 상태(SOP)를 나타낸다. 도 2에 도시하는 바와 같이, 선형의 모든 편광 상태는 뽀앙까레 구면(200)의 적도(210) 상에 있고, 좌회전 편광과 우회전 편광은 각각 북극(220)과 남극(230)[북극(220)의 반대쪽에 있음]에 있다. 뽀앙까레 구면(200) 상의 각 편광 상태(SOP)는 수학식 6 내지 수학식 8을 사용함으로써 위도 2ψ와 경도 2λ로 식별가능하다.

수학식 6

$$s_1(\omega) = \cos(2\varphi)\cos(2\lambda)$$

수학식 7

$$s_2(\omega) = \cos(2\varphi)\sin(2\lambda)$$

수학식 8

$$s_3(\omega) = \sin(2\varphi)$$

여기서, 2 개의 직교 편광 상태(SOP)는 서로 정반대쪽에 위치하고 있다. 예컨대, 선형의 수직 편광(212)은 적도(210) 상에서 선형의 수평 편광(214)으로부터 180도 떨어져 있다.

도 1을 참조하면, 편광계(170)는 신호의 스펙트럼에서 스토크스 벡터 $\hat{s}(\omega)$ 의 가중처리된 평균을 측정한다. 이 평균화된 편광 상태(SOP) $\vec{r}$ 는 수학식 9로 주어진다.

수학식 9

$$\vec{r} = \int \frac{d\omega}{2\pi} |f(\omega)|^2 \hat{s}(\omega)$$

여기서, $|f(\omega)|^2$ 은 $\int \frac{d\omega}{2\pi} |f(\omega)|^2 = 1$ 에 대해서 정규화된 필터링 후의 테스트 신호 스펙트럼이다. 협대역으로 필터링된 테스트 신호의 제한에 있어서, $|f(\omega)|^2 \to \delta(\omega - \omega_0)$ 이고 $\vec{r} \to \hat{s}(\omega_0)$ 이다. 여기서, ω_0 는 공칭 단색 펄스의 주파수이다.

편광 모드 분산(PMD) 스토크스 벡터 $\vec{\Omega}(\omega)$ 는 뽀앙까레 구면 상의 테스트 신호 편광 상태(SOP) 궤적 $\hat{s}(\omega)$ 를 주파수의 함수로서 나타내고, 수학식 10으로 테스트 신호 편광 상태(SOP)에 관련되어 있다.

수학식 10

$$\frac{d}{d\omega}\hat{s}(\omega) = \vec{\Omega} \times \hat{s}(\omega)$$

편광 모드 분산(PMD) 스토크스 벡터의 크기는 차등 군속도 지연(DGD), 즉 $\left|\vec{\Omega}\right| \equiv \tau_{DGD}$ 이고, 그의 방향 $\hat{\Omega}$ 는 주 편광 상태(PSP)의 방향이다.

ω 0 를 중심으로 $\hat{s}(\omega)$ 의 테일러 급수를 최고 2차까지 취하고, 수학식 9에 대입하여 수학식 10을 이용하면, 파라미터 Δω pulse 와 Δω 2 pulse 의 함수로서, 측정된 편광 상태(SOP) $\vec{r}$ 의 표현식을 수학식 11로 얻는다.

수학식 11

$$\vec{r} = \hat{s}(\omega_0) + \Delta\omega_{pulse}\left[\vec{\Omega}\times\hat{s}(\omega_0)\right] + \frac{1}{2}\Delta\omega_{pulse}^2\left[\vec{\Omega}\times[\vec{\Omega}\times\hat{s}(\omega_0)] + \vec{\Omega}_\omega\times\hat{s}(\omega_0)\right]$$

여기서, $\Delta\omega_{pulse} \equiv \int\frac{d\omega}{2\pi}|f(\omega)|^2(\omega-\omega_o)$, $\Delta\omega_{pulse}^2 \equiv \int\frac{d\omega}{2\pi}|f(\omega)|^2(\omega-\omega_o)^2$ 및 $\vec{\Omega}_\omega \equiv \frac{d\vec{\Omega}}{d\omega}$ 은 2차 편광 모드 분산(PMD)이다. 수학식 11은 $\vec{r}$ 이 순수 편광 상태 $\hat{s}(\omega_0)$ 로부터 벡터 $\vec{M}$ 만큼 섭동된 것을 나타낸다. 벡터 $\vec{M}$ 는 수학식 12로서 정의된다.

수학식 12

$$\vec{M} \equiv \vec{r} - \hat{s}(\omega_0) = \Delta\omega_{pulse}\left[\vec{\Omega}\times\hat{s}(\omega_0)\right] + \frac{1}{2}\Delta\omega_{pulse}^2\left[\vec{\Omega}\times[\vec{\Omega}\times\hat{s}(\omega_0)] + \vec{\Omega}_\omega\times\hat{s}(\omega_0)\right]$$

도 3의 (a) 내지 (d)를 참조하면, 복굴절 크리스탈 또는 편광 유지 섬유 등에 대해서와 같은 순수 1차 편광 모드 분산(PMD)(즉, $\vec{\Omega}_\omega = 0$)를 갖는 시스템이 도시되어 있다. 이 경우, $\vec{M}$ 은 주 편광 상태(PSP) 축에 수직인 평면에 있는 벡터이다. 스토크스 벡터 $\hat{s}(\omega_0)$ 를 갖는 단색 신호의 경우, $\vec{M} = 0$ 과 $\vec{r}$ 은 뽀앙까레 구면의 표면에 있는 점이다. $\vec{r}$ 이 대체로 실제 시스템의 경우에서와 같이 1차 편광 모드 분산(PMD)(즉, 넌제로 $\vec{\Omega}$)을 갖는 시스템에서의 유한 대역폭 상에서 측정되면, 이것은 부분적으로 편광되는 평균 편광 상태(SOP)(즉, $|\vec{r}|<1$)를 나타내고, $\vec{r}$ 는 뽀앙까레 구면의 표면을 출발한다. 신호의 스펙트럼 대역폭을 증가시킴에 따라서, 평균 편광 상태(SOP)는 뽀앙까레 구면의 표면에서 발원하고 주 편광 상태(PSP)를 향해 내부로 이동해 들어가는 궤적을 묘사한다.

도 4의 (a) 및 (b)를 참조하면, ω 0 (즉, $\Delta\omega_{pulse} = 0$)에 대해서 대칭인 스펙트럼과 순수 1차 편광 모드 분산(PMD)을 가지는 시스템의 경우, $\vec{M}$ 은 수학식 13으로 감소한다.

수학식 13

$$\vec{M} = \frac{1}{2}\Delta\omega_{pulse}^2\,\vec{\Omega}\times[\vec{\Omega}\times\hat{s}(\omega_0)]$$

$\vec{\Omega}\times\vec{\Omega}\times$ 항은 $\vec{\Omega}$ 에 수직인 성분의 감소를 나타낸다(일반적으로는 $\vec{s}_{\perp}(\omega_o)$ 로 불리며 식 $\vec{s}_{\perp}=\hat{s}-\frac{(\hat{s}.\vec{\Omega})\vec{\Omega}}{\tau_{DGD}^2}$ 로 주어짐). 다음의 수학식 14 및 수학식 15가 된다.

수학식 14

$$\bar{r}=\hat{s}(\omega_o)-\frac{1}{2}\Delta\omega_{pulse}^2\tau_{DGD}^2\vec{s}_{\perp}(\omega_o)$$

수학식 15

$$\vec{M}=-\frac{1}{2}\Delta\omega_{pulse}^2\tau_{DGD}^2\vec{s}_{\perp}(\omega_o)$$

$\hat{\Omega}$ 가 주 편광 상태(PSP)에 평행하다는 점을 상기하면, 벡터 $\vec{M}$ 은 도 4의 (a)에서 보는 바와 같이 ω가 변화할 때 $\hat{s}(\omega)$ 만큼 궤적 이탈된 호(arc)의 중심을 향해서 지향한다. 따라서, 평균 편광 상태(SOP) $\vec{r}$ 은 스펙트럼 대역폭이 증가함에 따라서 주 편광 상태(PSP) 방향을 향해서 정렬한다.

대역폭의 함수로서 측정된 편광 상태(SOP)의 편광도(DOP: Degree Of Polarization) $\Delta\omega_{pulse}^2$ 는 수학식 16으로 주어진다.

수학식 16

$$DOP^2\equiv|\vec{r}|^2=1-\Delta\omega_{pulse}^2\tau_{DGD}^2\left|\vec{s}_{\perp}(\omega_0)\right|^2$$

따라서, 수학식 14와 수학식 16은 $\vec{\Omega}$ 을 풀 수 있도록 3 개의 독립 스칼라 방정식을 제공한다. $\vec{r}$ 과 DOP^2 의 성분의 직선도는 $\Delta\omega_{pulse}^2$ 에서 선형이며, 이들의 기울기는 각각 $\vec{g}_r=-\frac{1}{2}\tau_{DGD}^2\vec{s}_{\perp}(\omega_0)$ 와 $g_{DOP}=-\tau_{DGD}^2\left|\vec{s}_{\perp}(\omega_0)\right|^2$ 이다. 이들 방정식은 $\tau_{DGD}=\frac{2\left|\vec{g}_r\right|}{\sqrt{|g_{DOP}|}}$ 과 $\vec{s}_{\perp}(\omega_0)=\frac{-2\vec{g}_r}{\tau_{DGD}^2}$ 로서 재배열될 수 있다. 이들 기울기를 일련의 측정으로부터 추출함으로써, τ_{DGD} 와 $\vec{s}_{\perp}(\omega_0)$ 가 결정될 수 있다. $\vec{s}_{\perp}(\omega_0)$ 를 구한 결과, $\vec{\Omega}$ 의 단위 벡터는 $\hat{s}(\omega_0)-\vec{s}_{\perp}(\omega_0)$ 의 동일 방향에 있으므로, 주 편광 상태(PSP)가 구해진다. $\hat{s}(\omega_0)$ 는 수학식 14의 y-절편으로부터 얻는다.

전술한 형식은 스펙트럼이 ω_0 에 대해서 대칭인 상황을 취급하는 것이다. 그러나, 스펙트럼이 ω_0 에 대해서 비대칭이면, $\vec{M}$ 은 수학식 17이 된다.

수학식 17

$$\vec{M} = \Delta\omega_{pulse}\left[\vec{\Omega}\times\hat{s}(\omega_0)\right] + \frac{1}{2}\Delta\omega_{pulse}^2\,\vec{\Omega}\times[\dot{\vec{\Omega}}\times\hat{s}(\omega_0)]$$

대역폭이 증가하면, 도 4의 (b)에 도시하는 바와 같이 측정된 편광 상태(SOP)는 여전히 내부방향으로 이동해 들어간다. 평균 편광 상태(SOP)의 궤적은 더 이상 주 편광 상태(PSP) 축을 향해 이동하지 않지만, 그 궤적은 여전히, 법선 벡터가 주 편광 상태(PSP) 방향에 있는 평면에 위치하고 있다. 따라서, $\vec{M}$ 은 여전히 이 평면에 위치하고 있다.

2차 편광 모드 분산(PMD)도 역시 제공될 수 있다. 이러한 시스템에 있어서, $\vec{M}$ 은 수학식 12에서의 추가 벡터 성분 $\frac{1}{2}\Delta\omega_{pulse}^2\left[\vec{\Omega}_\omega\times\hat{s}(\omega_o)\right]$ 때문에, 더 이상 주 편광 상태(PSP)에 수직인 평면에 위치해 있지 않다.

대칭 스펙트럼인 경우(즉, $\Delta\omega_{pulse}=0$)에 있어서는 수학식 18 및 수학식 19가 된다.

수학식 18

$$\vec{r} = \hat{s}(\omega_o) + \frac{1}{2}\Delta\omega_{pulse}^2\left[\vec{\Omega}\times[\vec{\Omega}\times\hat{s}(\omega_o)] + \vec{\Omega}_\omega\times\hat{s}(\omega_o)\right]$$

수학식 19

$$\vec{M} = \frac{1}{2}\Delta\omega_{pulse}^2\left[\vec{\Omega}\times[\vec{\Omega}\times\hat{s}(\omega_o)] + \vec{\Omega}_\omega\times\hat{s}(\omega_o)\right]$$

수학식 18 및 수학식 19로부터, 대칭 스펙트럼 상에서 평균 편광 상태(SOP)를 취하면 2차 편광 모드 분산(PMD)은 $\vec{r}$ 과 $\dot{\vec{M}}$ 에서의 1차 편광 모드 분산(PMD)에서와 동일한 정도의 크기가 된다. 2차 편광 모드 분산(PMD) 파라미터의 평가치는 다음의 방법, 즉 (1) 1차 편광 모드 분산(PMD)의 효과를 분리시켜서 $\vec{\Omega}$ 를 결정하는 방법과, (2) 수학식 19를 이용하여 2차 편광 모드 분산(PMD) $\vec{\Omega}_\omega$ 를 결정하는 방법을 이용하여 얻는다.

1차 편광 모드 분산(PMD)의 효과를 분리시키기 위해서, 2 개의 상이한 신호 스펙트럼 $|f_1|^2$ 과 $|f_2|^2$ 이 사용되며, 이들은 각각 상이한 대역폭 $\{\Delta\omega_1, \Delta\omega_1^2\}$ 과 $\{\Delta\omega_2, \Delta\omega_2^2\}$ 을 제공한다. 수학식 12로부터 대응하는 $\dot{\vec{M}}$ 벡터는 수학식 20 및 수학식 21이 된다.

수학식 20

$$\dot{\vec{M}}_1 = \Delta\omega_1\left[\vec{\Omega}\times\hat{s}(\omega_0)\right] + \frac{1}{2}\Delta\omega_1^2\left[\dot{\vec{\Omega}}\times[\dot{\vec{\Omega}}\times\hat{s}(\omega_0)] + \dot{\vec{\Omega}}_\omega\times\hat{s}(\omega_0)\right]$$

수학식 21

$$\vec{M}_2 = \Delta\omega_2 \left[\vec{\Omega} \times \hat{s}(\omega_0) \right] + \frac{1}{2} \Delta\omega_2^2 \left[\vec{\Omega} \times [\vec{\Omega} \times \hat{s}(\omega_0)] + \vec{\Omega}_\omega \times \hat{s}(\omega_0) \right]$$

수학식 20을 $\Delta\omega_2^2$ 으로 곱하고 수학식 21을 $\Delta\omega_1^2$ 으로 곱한 후 하나에서 다른 하나를 뺌으로써, 2차 편광 모드 분산(PMD) 종속항을 제거할 수 있다. $\vec{T}(\omega_o) = \frac{\Delta\omega_2^2}{\Delta\omega_1^2}\vec{M}_1 - \vec{M}_2$ 을 정의하면, 1차 편광 모드 분산(PMD)에만 종속하는 벡터를 수학식 22에서와 같이 얻는다.

수학식 22

$$\vec{T}(\omega_o) = \left[\vec{\Omega} \times \hat{s}(\omega_o) \right] (\Delta\omega_1 \frac{\Delta\omega_2^2}{\Delta\omega_1^2} - \Delta\omega_2)$$

상이한 스펙트럼 세트 $\{|f_1|^2, |f_2|^2\}$ 를 이용하면, 벡터 $\vec{T}(\omega_o)$ 의 다양한 성분이 $(\Delta\omega_1 \frac{\Delta\omega_2^2}{\Delta\omega_1^2} - \Delta\omega_2)$ 의 다양한 세트로 도해되는 경우에 수학식 22의 기울기로부터 $\vec{\Omega} \times \hat{s}(\omega_o)$ 를 도출할 수 있다. $\vec{T}(\omega_o)$ 가 $\vec{\Omega} \times \hat{s}(\omega_o)$ 에 평행하고, 이것은 ω가 변화될 때 $\hat{s}(\omega)$ 만큼 궤적 이탈한 뽀앙까레 구면의 호(arc) 상에 있는 탄젠트 벡터라는 것을 유념할 가치가 있다. $\frac{d}{d\omega}\hat{s}(\omega) = \vec{\Omega} \times \hat{s}(\omega)$ 이라는 점을 상기하면, 대안으로, ω가 극소량만큼 변하는 경우에 $\vec{\Omega} \times \hat{s}(\omega_o)$ 는 스토크스 벡터 $\hat{s}(\omega)$ 의 차분 변화(differential change)로부터 근사될 수 있다. 그러나, 전술한 방법은 유한 대역폭 스펙트럼의 다양한 대역폭을 이용함으로써, 또 평균 편광 상태(SOP)가 측정되는 것에 의해서, 수학식 22의 직선도의 기울기로부터 $\vec{\Omega} \times \hat{s}(\omega_o)$ 를 평가하기 때문에 더욱 정밀하다.

도 5를 참조하면, $\vec{T}(\omega_o)$ 및 이것의 $\vec{M}_1$ 및 $\vec{M}_2$ 와의 관계를 가시화하는데 도움을 주기 위해서, 비대칭인 $|f_1|^2$ 과 대칭인 $|f_2|^2$ 의 조합(여기서, $\Delta\omega_2^2 = \Delta\omega_1^2$ 임)인 특수한 경우가 사용된다. $|f_2|^2$ 이 대칭이므로, $\Delta\omega_2 = 0$ 이다. 따라서, $\vec{T}(\omega_o)$ 는 수학식 23으로 감소한다.

수학식 23

$$\vec{T}(\omega_o) = \vec{M}_1 - \vec{M}_2 = \Delta\omega_1 \left[\vec{\Omega} \times \hat{s}(\omega_o) \right]$$

$\vec{\Omega} \times \hat{s}(\omega_o)$ 로부터 $\vec{\Omega}$ 을 얻기 위해서, 다른 벡터, 예컨대 $\vec{\Omega} \times \hat{s}'$ 를 알 필요가 있다. $\vec{\Omega} \times \hat{s}(\omega_o)$ 과 $\vec{\Omega} \times \hat{s}'$ 의 벡터곱(cross-product)를 취하고 벡터 항등식 $a \times (b \times c) = (a.c)b - (a.b)c$ 를 사용함으로써, 1차 편광 모드 분산(PMD)

은 수학식 24의 관계로부터 얻는다.

수학식 24

$$\vec{T}(\omega_o) = \vec{M}_1 - \vec{M}_2 = \Delta\omega_1 \left[\vec{\Omega} \times \hat{s}(\omega_o) \right]$$

$\vec{\Omega} \times \hat{s}'$ 을 경험적으로 얻기 위해서는 적어도 2 가지 상이한 방법이 존재한다.

제1 방법은 주 편광 상태(PSP)의 대역폭을 이용하는 것이다. 광 주파수 ω $_1$ 이 ω $_0$ 를 중심으로 하여 이 주 편광 상태(PSP) 대역폭 내에 있는 경우, $\vec{\Omega}(\omega_1) \approx \vec{\Omega}(\omega_o) \simeq \vec{\Omega}$ 를 근사할 수 있다. 따라서, 상기 측정과 분석을 반복하고 ω $_1$ 에 대해서 수학식 22를 사용함으로써, $\vec{\Omega}$ 의 계산에 대해서 $\vec{\Omega} \times \hat{s}(\omega_1)$ 을 얻는다. ω $_0$ 과 ω $_1$ 이 분리되어 있지만 이 주 편광 상태(PSP) 대역폭 내에 머물러 있다면, $\vec{\Omega} \times \hat{s}(\omega_o)$ 와 $\vec{\Omega} \times \hat{s}(\omega_1)$ 에 의해서 마주보는 각은 각각, 0.7 라디안[C.D. Poole 등의 논문으로서, 1988년 7월 J. Lightwave Tech.지의 Vol.6, No.7, pp 1185-1190에 실린 'Polarization Dispersion and Principle States in a 147 ㎞ Undersea Lightwave Cable'에 개시됨]과 0.8 ±0.4 라디안[S.Betti 등의 논문으로서, 1991년 4월 Opt. Lett.지의 Vol.16, No.7, pp 467-469에 실린 'Evolution of the bandwidth of the principle states of polarization in single mode fibers'에 개시됨]이라고 한다. 이들 참조 논문 모두는 전체가 참고로 본 명세서에 합체되어 있다.

제2 방법은 제2 입력 편광 상태(SOP)를 이용하여 행해지는 다른 측정 세트를 이용한다. 제2 입력 편광 상태(SOP)에 대해서 측정과 분석을 반복함으로써 $\vec{\Omega} \times \hat{s}'$ 가 얻어진다. 이 방식은 저속 편광 스크램블러(예컨대, 수 ㎑)가 예컨대 에르븀이 도핑된 광섬유 증폭기(EDFA: Erbium-Doped Fiber Amplifier)에서 편광 홀 버닝(polarization hole burning)을 극복하기 위해서 구현되는 광통신 시스템에 적절할 수 있다. 편광 스크램블링은 매 밀리초 간격마다 편광 모드 분산(PMD) 특징에 대해서 복수 개의 상이한 입력 편광 상태(SOP)를 제공하며, 이것은 특징의 정밀도를 개선할 수 있다. 이들 모든 $\vec{\Omega} \times \hat{s}'$ 벡터에 수직한 단위 벡터를 찾도록 최소 자승 고정 알고리즘(least square fit algorithm)을 사용함으로써, 주 편광 상태(PSP)의 배향을 결정할 수 있다.

2차 편광 모드 분산(PMD) $\vec{\Omega}_\omega$ 는 수학식 19에 따라서 결정된다. 수학식 19에 있는 정보는 $\vec{M}$ 대 $\Delta\omega^2_{pulse}$ 의 성분의 그래프로부터 결정될 수 있고, 이것은 대칭 스펙트럼 $|f_2|^2$ 을 이용하여 얻어지는 데이터에 대해서 실질적으로 선형이다. 이들 그래프의 경험적으로 결정된 기울기 $\vec{g}$ 는 $\vec{\Omega} \times [\vec{\Omega} \times \hat{s}(\omega_o)] + \vec{\Omega}_\omega \times \hat{s}(\omega_o)$ 의 성분에 대응한다. 따라서, $\vec{\Omega}_\omega \times \hat{s}(\omega_o)$ 의 성분은 $\vec{\Omega}$ 및 $\hat{s}(\omega_o)$ 의 알려진 성분을 수학식 25의 우변에 대입함으로써 결정된다.

수학식 25

$$\vec{\Omega}_\omega \times \hat{s}(\omega_o) = \vec{g} - \vec{\Omega} \times [\vec{\Omega} \times \hat{s}(\omega_o)]$$

$\vec{\Omega} \times \hat{s}'$ 를 얻기 위해서 전술한 방법에 유사한 방법을 이용하면 벡터 $\vec{\Omega}_\omega \times \hat{s}'$ 이다. $\vec{\Omega}_\omega \times \hat{s}(\omega_o)$ 와 $\vec{\Omega}_\omega \times \hat{s}'$ 의 벡터곱을 취하고 벡터 항등식 $a \times (b \times c) = (a.c)b - (a.b)c$ 를 적용함으로써, 2차 편광 모드 분산(PMD)은 수학식 26으로부터 결정될 수 있다.

수학식 26

$$\vec{\Omega}_{\omega} = \frac{(\vec{\Omega}_{\omega} \times \hat{s}(\omega_o)) \times (\vec{\Omega}_{\omega} \times \hat{s}')}{(\vec{\Omega}_{\omega} \times \hat{s}(\omega_o)).\hat{s}'}$$

대칭 및 비대칭 대역폭 확장을 위해서 신호의 편광 상태(SOP)를 측정하고 전술의 방법을 구현하는 방법은 여러 가지가 있다. 도 6의 (a) 및 (b)를 참조하면, 하나의 방식은 도 6의 (a)에 도시된 바와 같은 전송 곡선을 가지는 몇 개의 상이한 광학 필터를 이용하여 평균 편광 상태(SOP)를 측정하는 단계를 포함할 수 있다. 정규화되지 않은 전송 스펙트럼 $(|F_1|^2 \cdots |F_N|^2)$ 은 온라인 신호 스펙트럼과 이들 전송 곡선의 곱이다. 도 6의 (a)에 있는 광 주파수 ω_a 와 ω_b 는 주 편광 상태(PSP) 대역폭의 약 두 배만큼 분리될 수 있다. 도 6의 (b)는 필터의 전송 대역폭이 증가되는 경우에 평균 편광 상태(SOP)의 대응하는 궤적(610)을 도시하고 있다.

이들 측정된 평균 편광 상태(SOP)로부터, 중첩하는 2 개의 스펙트럼의 차에 대한 평균 편광 상태(SOP)가 계산될 수 있다. 예컨대, 스펙트럼 $|F_1|^2$ 의 평균 편광 상태(SOP) $\vec{r}_1$ 과 스펙트럼 $|F_2|^2$ 의 평균 편광 상태(SOP) $\vec{r}_2$ 이 알려져 있다면 이들 스펙트럼간의 차의 평균 편광 상태(SOP) $(|F_2|^2 - |F_1|^2)$ 은 수학식 27을 사용하여 계산될 수 있다.

수학식 27

$$\vec{r}_{diff} = \frac{\vec{r}_2\left(\int |F_2|^2 d\omega\right) - \vec{r}_1\left(\int |F_1|^2 d\omega\right)}{\int |F_2|^2 d\omega - \int |F_1|^2 d\omega}$$

마찬가지로, 중첩하지 않는 2 개의 스펙트럼의 합의 평균 편광 상태(SOP)도 계산될 수 있다. 예컨대, $(|F_2|^2 - |F_1|^2)$ 의 $\vec{r}_{diff}$ 과 $(|F_3|^2 - |F_2|^2)$ 의 $\vec{r}'_{diff}$ 를 알고 있다면, 수학식 28에 의해서 $(|F_2|^2 - |F_1|^2)$ 스펙트럼과 $(|F_3|^2 - |F_2|^2)$ 스펙트럼의 조합 스펙트럼의 평균 편광 상태(SOP)를 얻을 수 있다.

수학식 28

$$\vec{r}_{sum} = \frac{\vec{r}_{diff}\left(\int (|F_2|^2 - |F_1|^2)\, d\omega\right) + \vec{r}'_{diff}\left(\int (|F_3|^2 - |F_2|^2) d\omega\right)}{\left(\int (|F_2|^2 - |F_1|^2)\, d\omega\right) + \left(\int (|F_3|^2 - |F_2|^2) d\omega\right)}$$

수학식 27과 수학식 28을 이용하여, 측정된 스펙트럼의 모든 조합의 합 또는 차에 대응하는 편광 상태(SOP)를 결정하는 것이 가능하다.

전술한 방법을 이용하여 광섬유의 1차 편광 모드 분산(PMD) 및 2차 편광 모드 분산(PMD)을 특징짓기 위해서, 4 세트의 평균 편광 상태(SOP) 데이터가 결정될 수 있다. $\omega_a < \omega_0 < \omega_1 < \omega_b$ 일 때 2 개의 상이한 주파수 ω_0 와 ω_1 에 대한 대역폭에 있어서 하나는 대칭 대역폭 확장(bandwidth broadening)에 대한 것이고, 다른 하나는 비대칭 대역폭 확장에 대한 것이다. 이들 4 개의 데이터 세트는 수학식 27과 수학식 28을 사용하여 $(|F_1|^2 \cdots |F_N|^2)$ 의 스펙트럼을 빼고 조합함으로써 구성된다. 일단 구성되면, 프로세서는 초기에 수학식 24를 이용하여 1차 편광 모드 분산(PMD)을 결정하고, 이어서 수학식 26을 이용하여 2차 편광 모드 분산(PMD)을 결정한다.

본 발명의 방법 및 시스템의 정신 및 범위를 벗어나지 않고서도 본 발명에 대한 다양한 변형예가 만들어질 수 있다는

것을 이해할 것이다. 예컨대, 전술한 시스템은 광섬유에서의 편광 모드 분산(PMD)을 특징짓는데 사용되지만, 본 명세서에 개시된 기술은 다른 광학 매체를 특징짓는데에도 사용될 수 있다. 예컨대, 이들 기술은 복굴절 크리스탈, 폴리머 또는 액정의 감속도(retardation)[즉, 1차 편광 모드 분산(PMD)] 및/또는 복굴절률을 결정하는데 사용될 수 있다. 다른 예에는 광학 지연 선로의 차등 군속도 지연(DGD)을 특징짓는 것이 포함된다. 따라서, 다른 실시예들은 특허청구범위의 범주 내에 속한다.

(57) 청구의 범위

청구항 1.
광학 매체에서의 편광 모드 분산을 특징화하는 방법으로서,

복수 개의 스펙트럼의 각 스펙트럼- 각 스펙트럼은 상기 복수 개의 스펙트럼 중 다른 스펙트럼과는 주파수 대역폭이 상이함 -에 대해서 상기 광학 매체에서의 광신호의 평균 편광 상태 벡터를 측정하는 단계와,

평균 편광 상태 벡터와 주파수 대역폭으로부터 상기 편광 모드 분산의 특징을 결정하는 단계

를 포함하는 것인 광학 매체에서의 편광 모드 분산 특징화 방법.

청구항 2.
제1항에 있어서, 상기 복수 개의 스펙트럼의 적어도 일부는 미리 정의된 주파수에 대해서 대칭 대역폭을 가지는 것인 광학 매체에서의 편광 모드 분산 특징화 방법.

청구항 3.
제1항에 있어서, 상기 복수 개의 스펙트럼의 적어도 일부는 미리 정의된 주파수에 대해서 비대칭 대역폭을 가지는 것인 광학 매체에서의 편광 모드 분산 특징화 방법.

청구항 4.
제1항에 있어서, 복수 개의 스펙트럼의 각 스펙트럼에 대해서 상기 측정된 평균 편광 상태 벡터로부터 2차 편광 상태 벡터를 결정하는 단계를 더 포함하고, 상기 2차 편광 상태 벡터의 각각은 미리 정의된 주파수에 대해서 대칭 대역폭을 가지는 것인 광학 매체에서의 편광 모드 분산 특징화 방법.

청구항 5.
제1항에 있어서, 복수 개의 스펙트럼의 각 스펙트럼에 대해서 상기 측정된 평균 편광 상태 벡터로부터 2차 편광 상태 벡터를 결정하는 단계를 더 포함하고, 상기 2차 편광 상태 벡터의 각각은 미리 정의된 주파수에 대해서 비대칭 대역폭을 가지는 것인 광학 매체에서의 편광 모드 분산 특징화 방법.

청구항 6.
제1항에 있어서, 상기 광신호의 평균 편광 상태 벡터를 측정하는 단계는 상기 광신호로부터 테스트 광신호를 유도하는 단계와, 상기 테스트 광신호를 광학적으로 필터링하는 단계와, 상기 필터링된 테스트 광신호의 평균 편광 상태 벡터를 측정하는 단계를 포함하는 것인 광학 매체에서의 편광 모드 분산 특징화 방법.

청구항 7.
제6항에 있어서, 상기 테스트 광신호를 광학적으로 필터링하는 단계는 복수 개의 대역통과 필터의 각 대역통과 필터를 통해서 상기 테스트 광신호를 순차적으로 지도하는 단계와, 상기 대역통과 필터의 각 대역통과 필터에 대해서 평균 편광 상태 벡터를 측정하는 단계를 포함하는 것인 광학 매체에서의 편광 모드 분산 특징화 방법.

청구항 8.
제1항에 있어서, 상기 편광 모드 분산의 특징을 결정하는 단계는 미리 정의 된 주파수에서의 편광 상태로부터 상기 평균 편광 상태 벡터의 섭동과, 상기 상이한 스펙트럼들의 대역폭에 관련된 파라미터를 측정하는 단계를 포함하는 것인 광학 매체에서의 편광 모드 분산 특징화 방법.

청구항 9.
제1항에 있어서, 상기 편광 모드 분산의 특징은 1차 편광 모드 분산의 측정치를 포함하는 것인 광학 매체에서의 편광 모드 분산 특징화 방법.

청구항 10.

제1항에 있어서, 상기 편광 모드 분산의 특징은 2차 편광 모드 분산의 측정치를 포함하는 것인 광학 매체에서의 편광 모드 분산 특징화 방법.

청구항 11.
제1항에 있어서, 상기 편광 모드 분산의 특징은 실시간으로 결정되는 것인 광학 매체에서의 편광 모드 분산 특징화 방법.

청구항 12.
제1항에 있어서, 상기 광학 매체는 광섬유인 것인 광학 매체에서의 편광 모드 분산 특징화 방법.

청구항 13.
제1항에 있어서, 상기 편광 모드 분산의 특징을 결정하는 단계는 뽀앙까레 구면에서의 상기 평균 편광 상태의 궤적을 주파수 대역폭의 함수로서 결정하는 단계를 포함하는 것인 광학 매체에서의 편광 모드 분산 특징화 방법.

청구항 14.
하나의 편광계에 대해서 광학적 테스트 신호의 전송 대역폭을 가변적으로 필터링하도록 배치된 가변 광학 필터와,

상기 필터링된 광학적 테스트 신호를 수신하고 각 전송 대역폭에 대해서 상기 광학적 테스트 신호의 평균 편광 상태를 측정하도록 구성된 편광계와,

상기 필터링된 광학적 테스트 신호의 상기 평균 편광 상태 및 상기 전송 대역폭에 기초하여 광 입력 신호의 1차 편광 모드 분산 파라미터와 2차 편광 모드 분산 파라미터를 결정하도록 구성된 제어기

를 포함하는 것인 광학 시스템.

청구항 15.
제14항에 있어서, 광신호를 제1 위치에서 제2 위치로 전송하도록 구성된 광섬유를 더 포함하고, 상기 광학적 테스트 신호는 상기 광신호로부터 유도되는 것인 광학 시스템.

청구항 16.
제14항에 있어서, 보상된 출력 광신호를 생성하기 위해서 상기 1차 편광 모드 분산 파라미터와 상기 2차 편광 모드 분산 파라미터에 기초하여 상기 광시호를 보상하도록 구성된 보상기를 더 포함하는 것인 광학 시스템.

청구항 17.
제16항에 있어서, 상기 광신호는 피드포워드 모드에서 보상되는 것인 광학 시스템.

청구항 18.
제16항에 있어서, 상기 제2 위치에서 상기 보상된 출력 광신호를 검출하도록 구성된 수신기를 더 포함하는 것인 광학 시스템.

청구항 19.
제14항에 있어서, 상기 제1 위치에서 상기 광신호를 상기 광섬유로 출발시키도록 구성된 송신기를 더 포함하는 것인 광학 시스템.

청구항 20.
제19항에 있어서, 상기 송신기는 편광 스크램블러를 포함하는 것인 광학 시스템.

청구항 21.
제14항에 있어서, 상기 광신호로부터 상기 광학적 테스트 신호를 유도하도록 구성된 탭을 더 포함하는 것인 광학 시스템.

청구항 22.
제21항에 있어서, 상기 탭은 상기 제2 위치 부근에서 상기 광섬유에 결합되는 것인 광학 시스템.

청구항 23.
제14항에 있어서, 상기 광학적 테스트 신호의 상기 1차 편광 모드 분산 파라미터와 상기 2차 편광 모드 분산 파라미터는 상기 광신호의 1차 편광 모드 분산 파라미터와 2차 편광 모드 분산 파라미터에 관련되어 있는 것인 광학 시스템.

청구항 24.
광신호를 제1 위치와 제2 위치 사이에 전송하도록 구성된 광섬유와,

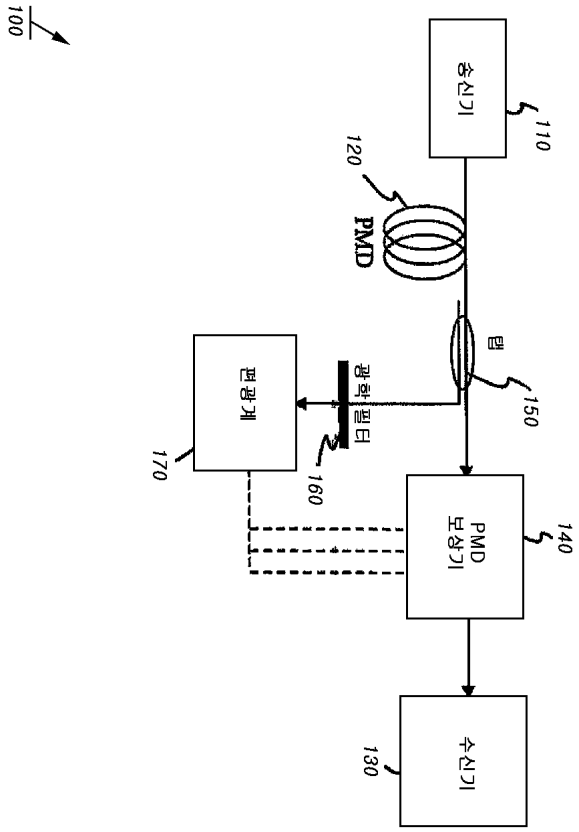
상기 광신호로부터 유도된 광학적 테스트 신호를 수신하고, 상기 광학적 테스트 신호의 상이한 전송 대역폭에 대해서 평균 편광 상태를 측정하도록 구성된 편광계와,

상기 편광계와 통신하고, 상기 광학적 테스트 신호의 상기 평균 편광 상태 및 상기 전송 대역폭에 기초하여 상기 광신호의 1차 편광 모드 분산 파라미터와 2차 편광 모드 분산 파라미터를 결정하도록 구성된 제어기

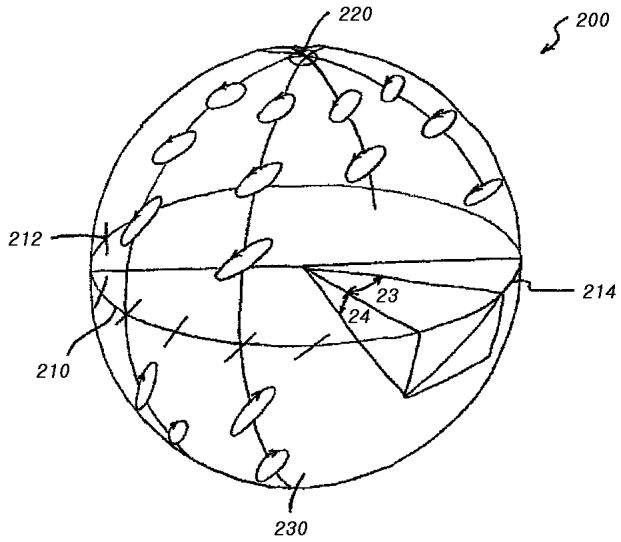
를 포함하는 것인 광학 시스템.

도면

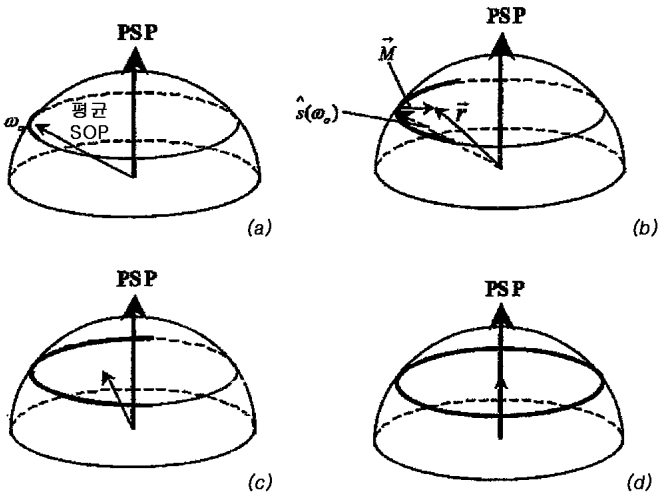
도면1



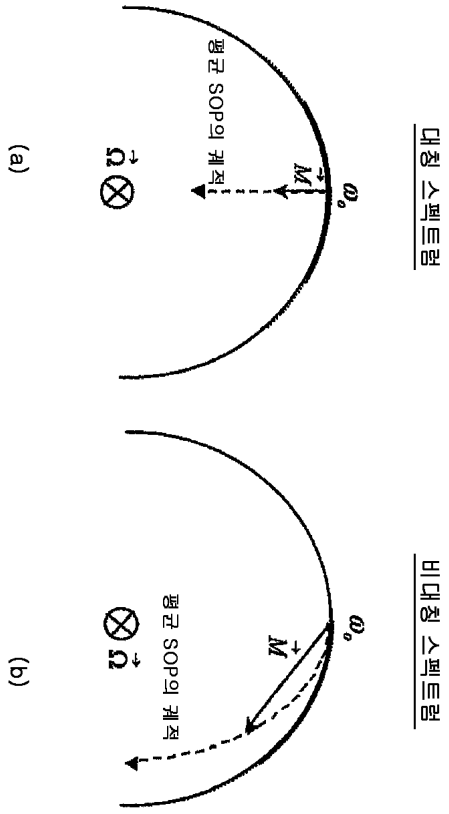
도면2



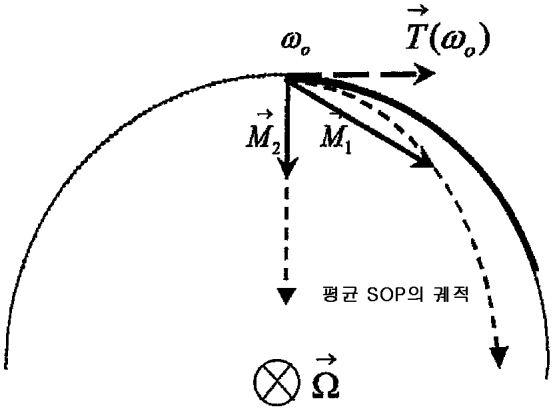
도면3



도면4


(a)
대칭 스펙트럼
ω_o
$\vec{M}$
평균 SOP의 궤적
$\vec{\Omega}$
(b)
비대칭 스펙트럼
ω_o
$\vec{M}$
평균 SOP의 궤적
$\vec{\Omega}$

도면5


ω_o
$\vec{T}(\omega_o)$
$\vec{M}_2$
$\vec{M}_1$
평균 SOP의 궤적
$\vec{\Omega}$

도면6