



(19) 대한민국특허청(KR)  
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2015년11월27일  
(11) 등록번호 10-1572080  
(24) 등록일자 2015년11월20일

- (51) 국제특허분류(Int. Cl.)  
G01J 3/28 (2006.01) G02B 5/20 (2006.01)
- (52) CPC특허분류  
G01J 3/28 (2013.01)  
G02B 5/20 (2013.01)
- (21) 출원번호 10-2015-0029193(분할)
- (22) 출원일자 2015년03월02일  
심사청구일자 2015년03월02일
- (65) 공개번호 10-2015-0125549
- (43) 공개일자 2015년11월09일
- (62) 원출원 특허 10-2014-0052394  
원출원일자 2014년04월30일  
심사청구일자 2014년04월30일
- (56) 선행기술조사문헌  
KR1020140046234 A\*  
\*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

- (73) 특허권자  
광주과학기술원  
광주광역시 북구 첨단과기로 123 (오룡동)
- (72) 발명자  
이흥노  
광주광역시 북구 첨단과기로 123(오룡동) 광주과학기술원 정보통신공학부
- 이용비  
광주광역시 북구 첨단과기로 123(오룡동) 광주과학기술원 정보기전공학부
- 제임스 올리버  
광주광역시 북구 첨단과기로 123(오룡동) 광주과학기술원 정보통신공학부
- (74) 대리인  
김기문

전체 청구항 수 : 총 4 항

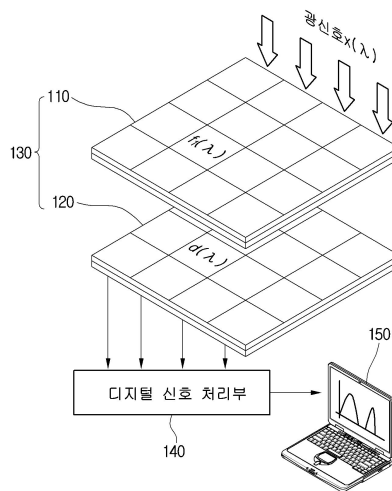
심사관 : 김창주

(54) 발명의 명칭 랜덤필터모듈의 투과율 검출방법

(57) 요약

본 발명의 따른 랜덤필터모듈의 투과율 검출방법에 따르면, 랜덤 트랜스미턴스 평선을 가지는 랜덤필터모듈의 투과율을 구하는 방법이고, 상기 랜덤필터모듈에, 이미 알려져 있는 정보를 가지는 광을 통과시켜서, 광센서장치의 각 광센서에서 감지되는 값을 측정하는 것; 및 상기 감지된 값을 이용하여 최적화 알고리즘으로 상기 랜덤필터모듈의 투과율을 얻는 것이 포함되는 것을 특징으로 한다. 이에 따르면 랜덤한 특성을 구현한 필터모듈의 투과율 함수를 실험에 의해서 정확하게 얻을 수 있다.

대표도 - 도1



이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 NN10360

부처명 미래창조과학부

연구관리전문기관 한국연구재단

연구사업명 중견연구자지원사업(도약)

연구과제명 부호 이론적 다중 압축 센싱 시스템 개발

기 여 율 1/1

주관기관 광주과학기술원

연구기간 2013.05.01 ~ 2014.04.30

공지예외적용 : 있음

---

**명세서**

**청구범위**

**청구항 1**

랜덤 트랜스미턴스 평선을 가지는 랜덤필터모듈의 투과율을 구하는 방법으로서,  
 상기 랜덤필터모듈에, 이미 알려져 있는 정보를 가지는 광을 통과시켜서, 광센서장치의 각 광센서에서 감지되는 값을 측정하는 것; 및  
 상기 감지된 값을 이용하여 최적화 알고리즘으로 상기 랜덤필터모듈의 투과율을 얻는 것이 포함되고,  
 상기 랜덤필터모듈에는,  
 입사되는 광의 광경로의 상측에 놓이는 그레이팅필터; 및  
 상기 입사되는 광의 광경로의 하측에 놓여 상기 랜덤필터모듈이 랜덤 트랜스미턴스 평선을 갖도록 하는 스퀘어링필터가 포함되는 랜덤필터모듈의 투과율 검출방법.

**청구항 2**

제 1 항에 있어서,  
 상기 랜덤필터모듈의 민감도행렬은

$$\min_{d_i} \| X^T d_i^T - y_i^T \|^2, \text{ such that } d_i \geq 0$$

에 의해서 구해지고,  $d_i$ 는 민감도행렬(D)의  $i$ 번째 행벡터이고,  $y_i$ 는 감지되는 값행렬(Y)의  $i$ 번째 행벡터이고, X는 상기 광의 정보이고,  
 상기 민감도행렬의 각 원소는 특정과장에 대한 해당하는 상기 랜덤필터모듈의 투과율인 랜덤필터모듈의 투과율 검출방법.

**청구항 3**

삭제

**청구항 4**

제 2 항에 있어서,  
 상기 민감도행렬의 원소값은 상기 광센서장치의 각 광센서에 대응되는 값의 형식인 랜덤필터모듈의 투과율 검출방법.

**청구항 5**

제 1 항에 있어서,  
 과장 및 세기를 이미 알고 있는 다수의 광을 상기 랜덤필터모듈을 통과시켜서, 상기 광센서장치의 각 광센서에서 감지되는 값을 측정하는 과정을 반복하는 것이 더 포함되는 랜덤필터모듈의 투과율 검출방법.

**발명의 설명**

**기술분야**

본 발명은 랜덤필터모듈에 관한 것이다. 또한, 본 발명은 랜덤필터모듈을 이용하는 분광기 및 그 랜덤필터모듈

[0001]

의 투과율을 검출하는 방법에 관한 것이다.

**배경 기술**

- [0002] 분광기는 광학, 화학, 해양공학 등 다양한 산업 분야 전반에 걸쳐서 핵심 기구로 사용되고 있다. 분광기는 물체로부터 나오는 갖가지 파장의 세기를 측정하여 그 정보를 그래프 혹은 스펙트럼 형태로 나타낸다. 분광기가 물체의 정보를 정확하고 세밀하게 나타내는 정도를 해상도(resolution)라고 한다. 상기 해상도는 분광기의 성능을 평가하는 중요한 요소로서 평가된다.
- [0003] 분광기 중에서 소형(miniature) 분광기는, 제조비용을 감소시키기 위한 일환으로 필터 장치를 사용하는 것으로서, 휴대용으로 편리하게 사용할 수 있다.
- [0004] 나노공정을 이용한 필터 장치 기술은 분광기의 크기를 초소형화하고, 이에 따른 대량 생산으로 생산가격을 크게 절감시킬 수 있다. 이러한 공정으로 생산된 소형 분광기는 실험실 밖 산업 현장에서 물질의 특성을 측정하는데 큰 도움이 된다. 또한, 컴퓨터 또는 다른 전자 기기와의 쉽게 접목하여 함께 사용할 수 있다. 이 밖에도 필터 장치 기반의 분광기는 광원의 스펙트럼 정보를 단시간에 측정할 수 있는 장점이 있다.
- [0005] 그러나, 분광기가 도달할 수 있는 해상도의 한계는 필터모듈에 제공되는 필터의 개수에 의해 결정될 수 있기 때문에, 해상도를 증가시키기 위해서는 필터의 개수를 늘리는 것을 고려할 수 있다. 그러나, 물리적인 제약조건 및 스펙트럼의 왜곡 등의 문제로 인하여 필터모듈의 필터 수를 늘리는 것은 현실적으로 어려운 문제가 있다.
- [0006] 해상도를 결정짓는 또 다른 요소로서 광필터의 투과율 함수(transmittance function)가 있다. 실제로 저 비용의 나노공정 필터 장치에 있어서, 광필터의 투과율 함수는 비이상적(non-ideal)이기 때문에, 이들 비이상적 광필터는 광신호 본래의 스펙트럼 정보를 왜곡시키게 된다. 따라서, 광신호 본래의 스펙트럼 정보를 알아내기 위해서는, 입력신호의 스펙트럼 성분에 대하여 디지털 신호처리가 수행될 필요가 있다.
- [0007] 이러한 디지털 신호처리방법의 대표적인 방법으로는, 비특허문헌 1로서 J. Oliver, W. B. Lee, S. J. Park, H. N. Lee, "improving resolution of miniature spectrometers by exploiting sparse nature of signals," Opt. Exp. 20, 2613-2625 (2012), 및 특허문헌 1로서 제시되는 특허출원번호 10-2012-0079171가 소개된 바가 있다. 상기 특허문헌 1은 본 발명의 발명자가 그 일원이 되어 발명한 것으로서, 광신호 본래의 스펙트럼 정보를 알아내기 위하여 L1 놉 최소화 알고리즘을 구현하고 있다. 그러나 상기 문헌에 제공되는 기술의 경우에도, 해상도를 향상시키는 것에 있어서는 한계가 있고, 결국 필터 장치에 제공되는 필터의 개수를 늘리는 것을 고려할 수밖에 없는 문제점이 있다.
- [0008] 상기되는 문제점을 해결하는 것으로서, 본 발명의 발명자가 그 일원이 되어 발명한 것으로서, 특허문헌 2 특허출원번호 10-2012-0112453호의 분광기 및 분광방법에는 필터는 랜덤필터모듈로 제안하고 분광대상의 빛이 랜덤필터모듈을 통과하면서 더 많은 정보를 가질 수 있도록 한다. 이로써 분광기의 해상도가 한층 더 향상되는 이점을 얻을 수 있었다.
- [0009] 그러나, 실제로 랜덤필터모듈을 구현하는 것은 많은 어려움이 있고, 구현된 랜덤필터모듈의 투과율함수를 구하는 것은 더욱 어려운 문제점이 있다.

**선행기술문헌**

**특허문헌**

- [0010] (특허문헌 0001) 특허문헌 1: 특허출원번호 10-2012-0079171
- (특허문헌 0002) 특허문헌 2: 특허출원번호 10-2012-0112453

**비특허문헌**

- [0011] (비특허문헌 0001) 비특허문헌 1: J. Oliver, W. B. Lee, S. J. Park, H. N. Lee, "improving resolution of miniature spectrometers by exploiting sparse nature of signals," Opt. Exp. 20, 2613-2625 (2012)

**발명의 내용**

**해결하려는 과제**

- [0012] 본 발명은 상기되는 문제점을 개선하기 위하여 제안되는 것으로서, 산업적으로 이용가능하고, 저렴한 가격으로 구현할 수 있고, 관심주파수 전역에 대한 필터를 제공할 수 있고, 각 랜덤필터모듈을 이루는 각 랜덤필터들의 투과율 간의 상관관계가 낮고, 서로 다른 파장에 대한 투과율 사이에 상관관계가 낮은 랜덤필터모듈을 제공한다.
- [0013] 또한, 위의 요구조건을 만족하도록 구현되는 랜덤필터모듈의 투과율을 정확하게 구하는 방법을 제공한다.
- [0014] 또한, 상기 랜덤필터모듈을 이용하여 동작하는 분광기를 제공하고자 한다.

**과제의 해결 수단**

- [0015] 본 발명에 따른 분광기에는, 입사되는 광을 필터링하는 랜덤필터모듈; 상기 랜덤필터모듈에 의해서 필터링된 광을 전하로 변환하여 출력하는 광센서 장치; 및 상기 광센서 장치의 출력신호를 디지털 신호처리하여 상기 입사되는 광의 스펙트럼 정보를 복구하는 디지털 신호 처리부가 포함되고, 상기 랜덤필터모듈에는, 상기 입사되는 광의 광경로의 상측에 놓이는 그레이팅필터; 및 상기 입사되는 광의 광경로의 하측에 놓이는 스캐터링필터가 포함되는 랜덤필터모듈을 이용하는 것을 특징으로 한다. 저렴한 가격으로 분광대상전역에 대하여 용이하게 분광기를 구성할 수 있고, 정확한 투과율을 얻을 수 있는 분광기를 얻을 수 있다.
- [0016] 상기 분광기에 있어서, 상기 그레이팅필터는 빛을 회절시키고, 상기 스캐터링필터는 빛을 산란시키는 랜덤필터모듈을 이용한다. 따라서, 간단하게 랜덤필터모듈을 구현할 수 있다. 또한, 상기 그레이팅필터 및 상기 스캐터링필터 중의 적어도 하나는 단일의 물품인 랜덤필터모듈을 이용함으로써, 더욱 저렴하게 랜덤필터모듈을 구현할 수 있다.
- [0017] 본 발명의 다른 측면에 따른 랜덤필터모듈은, 랜덤 트랜스미턴스 평선을 가지는 필터이고, 광경로에 놓이는 그레이팅필터; 및 상기 그레이팅필터를 통과한 광이 다시 통과하는 스캐터링필터가 포함되는 것을 특징으로 한다. 본 발명에 따르면 주파수 전역에 대한 랜덤한 특성을 용이하게 얻을 수 있다.
- [0018] 상기 랜덤필터모듈에서, 상기 그레이팅필터는 일방향으로 다수의 회절격자가 제공되고, 상기 스캐터링필터에는 임의의 방향 및 임의의 길이로 다수의 회절격자가 제공될 수 있다. 이로써 더욱 간단하고 저렴하게 랜덤필터모듈을 얻을 수 있다. 상기 그레이팅필터는 입사광을 회절시키고, 상기 스캐터링필터는 입사광을 산란시키는 것을 특징으로 함으로써, 간단하고 편리하게 랜덤특성을 구현할 수 있다.
- [0019] 본 발명의 또 다른 측면에 따른 랜덤필터모듈의 투과율 검출방법에 따르면, 랜덤 트랜스미턴스 평선을 가지는 랜덤필터모듈의 투과율을 구하는 방법이고, 상기 랜덤필터모듈에, 이미 알려져 있는 정보를 가지는 광을 통과시켜서, 광센서장치의 각 광센서에서 감지되는 값을 측정하는 것; 및 상기 감지된 값을 이용하여 최적화 알고리즘으로 상기 랜덤필터모듈의 투과율을 얻는 것이 포함되는 것을 특징으로 한다. 이에 따르면 랜덤한 특성을 구현한 필터모듈의 투과율 함수를 실험에 의해서 정확하게 얻을 수 있다.
- [0020] 상기 투과율 검출방법에 있어서, 상기 랜덤필터모듈의 민감도행렬은

$$\min_{d_i} \| X^T d_i^T - y_i^T \|^2, \text{ such that } d_i \geq 0$$

- [0021] 에 의해서 구해지고,  $d_i$ 는 민감도행렬(D)의  $i$ 번째 행벡터이고,  $y_i$ 는 감지되는 값행렬(Y)의  $i$ 번째 행벡터이고, X는 상기 광의 정보인 것을 특징으로 한다. 이에 따르면 음의 값을 가지지 않게 됨으로써, 더 실제로 사용할 수 있는 민감도 행렬을 구할 수 있다.

**발명의 효과**

- [0023] 본 발명에 따른 분광기에 적용될 수 있도록 신뢰성이 높은 랜덤필터모듈 방법을 제공할 수 있고, 상기 랜덤필터모듈의 투과율을 정확하게 구할 수 있고, 신뢰도 높은 분광기를 얻을 수 있다.

**도면의 간단한 설명**

- [0024] 도 1은 실시예에 따른 분광기의 구성도.
- 도 2는 실시예에 따른 분광방법을 설명하기 위한 흐름도.
- 도 3은 실시예에 따른 L1 놉 최소화 알고리즘을 설명하기 위한 흐름도.
- 도 4는 실시예에 따른 랜덤필터모듈의 구성을 보이는 도면.
- 도 5는 상기되는 방법으로 추정된 1번째 필터와 12번째 필터와 24번째 필터의 파장별 투과율을 나타내는 도면.

**발명을 실시하기 위한 구체적인 내용**

- [0025] 이하에서는 도면을 참조하여 본 발명의 구체적인 실시예를 상세하게 설명한다. 그러나, 본 발명의 사상은 이하의 실시예에 제한되지 아니하고, 본 발명의 사상을 이해하는 당업자는 동일한 사상의 범위 내에 포함되는 다른 실시예를 구성요소의 부가, 변경, 삭제, 및 추가 등에 의해서 용이하게 제안할 수 있을 것이나, 이 또한 본 발명의 사상에 포함된다고 할 것이다.
- [0026] 본 발명에서는 랜덤필터모듈 및 랜덤필터모듈의 투과율을 얻는 방법을 발명의 일 측면으로 하고 있다. 따라서 상기 랜덤필터모듈의 동작과 관련되는 부분에 대해서는 이하의 설명을 통하여 상세하게 설명한다. 하지만, 공지的事实로서 분광기의 동작에 사용되는 기술내용은, 위에서 종래기술로 인용되는 특허문헌 1과 특허문헌 2에 소개되는 분광기의 전체 동작에 대한 설명이 본 상세설명에 적용되는 것으로 하고, 그 관련되는 설명을 전체적으로 본 명세서에 기술하지는 않지만 본 명세서의 상세한 설명에 포함되는 것으로 이해해야 할 것이다.
- [0027] 도 1은 실시예에 따른 분광기의 구성도이다.
- [0028] 도 1을 참조하면, 실시예에 따른 분광기는 랜덤필터모듈(110), 광센서 장치(120), 및 디지털 신호 처리부(140), 및 분석 정보 제공부(150)를 포함할 수 있다.
- [0029] 상기 랜덤필터모듈(110)은 서로 다른 투과율 함수를 갖는 적어도 하나의 랜덤필터들의 집합으로 구성될 수 있다. 상기 랜덤필터모듈(110)은 광경로를 따라서 직렬로 구성되는 적어도 두 개의 랜덤필터로 구성될 수 있다. 상기 랜덤필터모듈(110)은 랜덤 트랜스미턴스 필터(Random Transmittance Filter)라고 이름할 수도 있다. 상기 랜덤 트랜스미턴스 필터는, 분광의 대상이 되는 전체 파장 대역에 대하여 투과율에 있어서 단지 하나 또는 두 개의 피크치를 가지는 비이상적인 필터와는 달리, 대상이 되는 전체 파장 대역에 걸쳐서 투과율이 다수개의 피크치를 가지는, 즉 랜덤 트랜스미턴스 평선(Random Transmittance Function)을 가지는 필터를 말한다. 예를 들어, 분광의 대상이 되는 전체 파장 대역이 400nm에서 800nm인 경우에, 비이상적인 필터인 경우의 투과율 함수는, 400nm에서 800nm 사이의 특정한 지점에서 단일 또는 두 개의 피크치를 가지며 서로 부드럽게 이어지는 곡선을 가진다. 이에 반하여 랜덤 트랜스미턴스 평선을 가지는 랜덤필터의 경우에는 400nm에서 800nm 사이의 어느 지점이 아니라 전체 영역에 걸쳐서 수없이 많은 피크치를 가지고 그래프가 급격하게 변하는 양상을 가질 수 있다.
- [0030] 상기 랜덤필터모듈로는 저렴한 가격으로 구현할 수 있는 것이 바람직하다. 또한 상기 랜덤필터모듈은 관심주파수 전역에 대한 필터를 제공하는 것이 바람직하는데, 이는 분광의 대상이 되는 광의 전체파장영역을 분광할 수 있도록 하기 위한 것이다. 또한 랜덤필터모듈을 이루는 랜덤필터의 투과율 간의 상관관계가 낮은 것이 바람직하는데, 이는 각 랜덤필터를 통하여 서로 다른 분광정보를 획득하는 것이 분광의 해상도를 향상시키는데 있어서 바람직하기 때문이다. 또한 랜덤필터모듈을 이루는 각 랜덤필터는 서로 다른 파장에 대한 투과율 사이의 상관관계가 낮은 것이 바람직하는데, 이는 각 랜덤필터를 통하여 서로 다른 파장에 대한 정보를 획득하는 것이 보다 향상되는 분광정보를 획득하기에 바람직하기 때문이다. 또한, 상기 랜덤필터모듈은 산업적으로 손쉽게 제공할 수 있도록 하여, 편리하게 구성할 수 있도록 하는 것이 바람직하다.
- [0031] 본 문헌에서는 상기되는 니즈를 만족시키는 랜덤필터모듈을 제안하는 것을 일 목적으로 하고, 상기 랜덤필터모듈의 상세한 구성은 뒤에 더 상세하게 설명하도록 한다.
- [0032] 상기 광센서 장치(120)는 광경로상에서 랜덤필터모듈(110)의 하측에 배치되며, 필터링된 광을 전기신호로 변환한다. 광센서 장치(120)는 예를 들어 CCD(Charge Coupled Device) 장치로 구성될 수 있다. 랜덤필터모듈(110)에서 랜덤하게 필터링된 광은 광센서 장치(120)의 각 센서로 입사한다. 상기 랜덤필터모듈(110)을 통과한 광신호는 광센서 장치(120)에서 전하의 형태로 변환된다. 랜덤필터모듈(110)과 광센서 장치(120)를 포함하는 구성을

좁은 의미의 소형 분광기(130)라고 할 수도 있다. 광센서 장치(120)의 출력은, 광신호의 본래의 스펙트럼을 추정하기 위해 디지털 신호 처리부(140)에 입력될 수 있다.

[0033] 상기 디지털 신호 처리부(140)는 랜덤필터모듈(110) 및 광센서 장치(120)를 통해 획득된 왜곡된 스펙트럼 신호로부터 광신호 본래의 스펙트럼 정보를 복구하기 위하여 디지털 신호 처리를 수행한다. 디지털 신호 처리부(130)는 DSP 칩으로 구현될 수 있다.

[0034] 상기 분석 정보 제공부(150)는 디지털 신호 처리부(140)에 의해 복구된 광신호의 스펙트럼 정보를 그래프나 기타 분석 정보로 제공한다. 예컨대, 분석 정보 제공부(150)는 분석 정보를 제공하는 소프트웨어를 내장한 마이크로 프로세서, 또는 컴퓨터일 수 있다.

[0035] 도 2는 실시예에 따른 분광방법을 설명하기 위한 흐름도이다.

[0036] 도 2를 참조하면, 상기 랜덤필터모듈(110)은 입사된 광신호에 대하여 필터링을 수행한다(S10). 이때, 상기 랜덤필터모듈(110)은 파장대별 투과율에 따라서, 특정의 파장 성분을 상기 광센서 장치(120)의 광센서로 일정량을 투과시킨다. 이에 따라, 랜덤필터모듈(110)로부터 얻어지는 스펙트럼 정보는 광신호 본래의 스펙트럼 정보와 함께, 광필터의 투과율 성분이 포함되어 포함될 수 있다.

[0037] 한편, 상기 랜덤필터모듈(110)을 통과하는 광은 실질적으로 분광의 대상이 되는 전체 파장 대역에 걸쳐서 광을 소정량을 투과시킬 수 있다.

[0038] 상기 광센서 장치(120)는 상기 랜덤필터모듈(110)에 의해 필터링된 광을 전하로 변환한다(S20). 이때에는 랜덤필터모듈(110)을 투과한 광을 받은 상기 광센서 장치(120)의 각 센서는 광의 파장과 무관하게 단일의 전하량으로 변환되는 것을 알 수 있다.

[0039] 디지털 신호 처리부(140)는 광센서 장치(120)의 출력 신호를 샘플링하여 L1 놈 최소화 알고리즘을 이용하여 광신호 스펙트럼을 복구한다(S30). 이후에는 복구된 광신호 스펙트럼이 분석정보로 제공된다(S40).

[0040] 상기 디지털 신호 처리부(140)의 디지털 신호 처리의 일 예에 대하여 설명한다. 상기 디지털 신호 처리부(140)의 디지털 신호 처리에는 불충분 선형 방정식계의 해를 구하는 프로세스가 수행된다. 디지털 신호 처리부(140)는 L1 놈 최소화(L1 norm minimization) 알고리즘을 이용하여 불충분 선형 방정식계의 해를 구하는 프로세스를 수행한다. L1 놈 최소화 알고리즘을 이용하여 불충분 선형 방정식계의 해를 구하는 프로세스는, 광신호의 스펙트럼 정보가 희소하게 분포한다는 성질을 이용한다. L1 놈 최소화 알고리즘은 신호들의 희소 특성을 이용하는 L1 놈 최소화 스펙트럼 추정 알고리즘이다.

[0041]  $x(\lambda)$  는 파장( $\lambda$ )에서 랜덤필터모듈(110)에 입사되는 원래 광신호의 스펙트럼 성분들을 나타낸다. 랜덤필터모듈(110)의 각 요소는 투과율 함수(transmittance function)의 형식으로 지정될 수 있다. 투과율 함수(전달함수라고 할 수도 있다)는, 필터가 주어진 파장( $\lambda$ )에서 허용되는 광의 분율(fraction)의 측정값이다.

[0042]  $f_i(\lambda)$  는 필터 장치의  $i$ 번째 요소의 전달함수이다.

[0043]  $d(\lambda)$ 는 모든 요소들에 대하여 동일하다고 가정하는 광센서 장치(120)의 민감도 함수를 나타낸다.  $D_i(\lambda_j)$ ,  $i=1,2,\dots, M$ , 는  $D_i(\lambda) = d(\lambda)f_i(\lambda)$  에 의해 주어지는 파장( $\lambda$ )에서  $i$ 번째 광센서 장치(120)의 민감도를 나타낸다. 각  $D_i(\lambda_j)$  는 파장( $\lambda$ )의 연속 함수이다.

[0044] 그러면  $i$ 번째 광센서 장치(120)의 출력  $y_i$  는  $y_i = \int D_i(\lambda)x(\lambda) d\lambda + w_i$  로 주어진다. 여기에서,  $w_i$  는 관찰 잡음 또는 측정 잡음이다.

[0045] 광센서 장치(120)의 출력으로부터 모든  $M$  샘플들을 수집하고 벡터의 형태로 그들을 벡터  $y$ 의 형식으로 정렬할 수 있다.  $y = [y_1, \dots, y_M]^T$

[0046] 광센서 장치(120)는 출력 신호는 출력 벡터( $y$ )로 나타낼 수 있다. 출력 벡터( $y$ )는 수학식 1의 선형 방정식으로 모델링될 수 있다.

수학식 1

$$\mathbf{y} = D\mathbf{x} + \mathbf{w}$$

수학식 1에서 D는 수학식 2와 같은 (M×N) 광센서 장치의 민감도 행렬이다.

수학식 2

$$\begin{bmatrix} D_1(\lambda_1) & D_1(\lambda_2) & \cdots & D_1(\lambda_N) \\ D_2(\lambda_1) & D_2(\lambda_2) & \cdots & D_2(\lambda_N) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ D_M(\lambda_1) & D_M(\lambda_2) & \cdots & D_M(\lambda_N) \end{bmatrix}$$

(M×1)벡터  $\mathbf{w}$ 의 각 성분들은 제로-평균과 분산  $\sigma^2$ 을 가진 가우스 확률 변수로서 모델링 될 수 있다.

$\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T$ 는 파장  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$ 에서 연속 신호 스펙트럼  $x(\lambda)$ 을 균일하게 샘플링함으로써 얻어진 신호 스펙트럼 벡터를 나타낸다.

$\mathbf{w}_{\lambda}$ 는 분광의 대상이 되는 신호 X의 총 대역폭을 나타낸다.

$\Delta\lambda_N = \frac{\mathbf{w}_{\lambda}}{N}$ 는 x의 샘플들 사이의 간격을 나타낸다.

수학식 2에서 값  $D_i(\lambda_j)$ 은 파장축을 따라 i번째 광센서 장치(120)의 민감도 함수를 균일하게 샘플링하여 얻어질 수 있다.

또한, 행렬 D의 조건부 숫자(conditional number)는 높을 수 있다. 비-이상적 전송 함수들은 서로 연관된 D의 열(row)들을 만들기 때문이다.

상기 광센서 장치(120)의 민감도 행렬 D가 주어진 상태에서, 관찰 y로부터 신호 스펙트럼 x의 추정( $\hat{\mathbf{x}}$ )을 위한 해결이 필요하다.

신호 스펙트럼 추정의 복구 정확성은 수학식 3과 같이 정의되는 평균 제곱 오류(MSE)의 측면에서 측정될 수 있다.

수학식 3

$$\text{MSE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2$$

여기에서  $x_i$ 는 X의 i번째 성분을 나타낸다.

수학식 1에서 잡음이 없을 경우에  $M \geq N$ 이면 충분 방정식이 되고,  $M < N$ 이면 불충분 방정식이 된다.

소형 분광기의 해상도는 공간적으로 근접한 스펙트럼 성분들을 구별하는 능력으로써 결정된다. 주어진 간격  $\Delta\lambda_N = \frac{\mathbf{w}_{\lambda}}{N}$ 에서, 분광기의 최대 달성 해상도는  $\Delta\lambda_{\max} = \mu_N \Delta\lambda_N = \mu_N \frac{\mathbf{w}_{\lambda}}{N}$ 로서 정의될 수 있다.



[0062] 여기에서,  $\mu_N$  는 수학적 식 4와 같이 주어진다.

**수학적 식 4**

[0063] 
$$\mu_N := \min_{\mu \in (1, 2, \dots, N-1)} \mu \quad \text{subject to} \quad \text{MSE} \leq \delta$$

[0064] 여기에서,  $\delta > 0$  는 사용자-정의된 양수이다.

[0065] 복구된 신호 스펙트럼과 입력 신호 스펙트럼 사이의 MSE가  $\delta$  이하이면, 서로 떨어져 있는 두 스펙트럼  $\mu_N \Delta \lambda_N$  는 분해할 수 있는 것으로 말할 수 있다. 고정된  $W_x$  에 대하여 샘플들 사이에 간격이  $\Delta \lambda_N = \frac{W_x}{N}$  로 주어지기 때문에 N를 증가시키면 간격  $\Delta \lambda_N$  을 감소시킬 수 있다. 그러므로, 최대 가능 해상도를 찾기 위해서는 N은 커질 필요가 있다.

[0066]  $\mu_N = 1$  에 대하여 구별되게 분해될 수 있는 서로  $\Delta \lambda_N$  떨어져 있는 두 개의 x의 연속 비 제로 스펙트럼 성분들이 있는지를 확인해 봐야 할 필요가 있다.

[0067]  $\mu_N = 2$  에 대하여 서로  $\Delta \lambda_N$  떨어져 있는 어떠한 쌍의 스펙트럼 성분들은 없고, 구별되게 분해되는 서로  $2\Delta \lambda_N$  떨어진 비-제로 스펙트럼의 몇몇 쌍들이 있다.

[0068] 수학적 식 1에서 임의의 자연 신호 또는 벡터 x는 직접적으로 희소하거나 어떤 기반, 즉  $\mathbf{x} = \Psi \mathbf{s}$ 에서 희소한 것으로 표현될 수 있다. 기반  $\Psi$  은 희소화 기반(sparse based)이라고 불리는  $(N \times N)$  행렬이며, 신호 s는 K-희소, 즉 s의 K 성분들은 비-제로이고, 잔여인 N-K는 제로이다. 그러므로 자연의 신호는 행렬  $\Psi$  의 단지 K행들의 선형 조합이다.  $\Psi = I$  (자기행렬)이고,  $\mathbf{x} = \mathbf{s}$ 일 때, 그러한 신호 x는 직접적으로 희소 신호라 불린다. 그것은 본질적으로 희소하다.

[0069] 따라서, 수학적 식 1에서 원 신호 스펙트럼 x는 K(가우스 커널)의 선형 조합, 즉,  $\mathbf{x} = \Psi \mathbf{s}$ 로서 모델링될 수 있다. 가우스 커널을 사용하는 이유는 스무스 가우스 커널은 일반적인 신호 스펙트럼의 스무스 특성을 보존할 수 있기 때문이다. 가우스 커널이 반드시 사용되어야 할 필요는 없으며, 만약, 신호 스펙트럼이 펄스와 같은 형태인 경우에는 다른 모델이 적용될 수 있는 것은 당연하다.

[0070] 또한, 가우스 커널의 스펙은 두 파라미터들, 즉 위치와 폭만을 필요로 한다. 이것은 특정 응용에서 신호 스펙트럼의 특성에 따라 선택될 수 있다. 커널 행렬  $\Psi$  를 구성하기 위해, 임의의 FWHM(full-width at half-maximum)를 가지는 단일 가우스 커널이 샘플링된다. 샘플링된 커널은  $\Psi$  의 제1 컬럼을 형성한다.  $\Psi$  의 남은 N-1 컬럼들은 제1 컬럼의 편이(shift)된 버전들로 제시될 수 있다. 가우스 커널의 샘플들 사이의 간격은  $\Delta \lambda_N$  이라 한다.

[0071] 희소 모델  $\mathbf{x} = \Psi \mathbf{s}$  을 사용하면, 수학적 식 1은 수학적 식 5와 같이 나타낼 수 있다.

**수학적 식 5**

[0072] 
$$\mathbf{y} = D\mathbf{x} + \mathbf{w} = D\Psi\mathbf{s} + \mathbf{w}$$

[0073] y의 차원은  $(M \times 1)$ 이고, D의 차원은  $(M \times N)$ 이며,  $M < N$ 이면서, s는  $N \times 1$ 이다. 수학적 식 1의 y로부터 s의 추정치  $(\hat{\mathbf{s}})$ 가 획득될 수 있다. y의 차원이 희소 신호 s의 차원보다 더욱 작음을 유의해야 할 필요가 있다. 희소 표현 이후에, 측정 벡터 y로부터 희소 신호의 고유한 복구를 위한 L1 놈(norm) 기준(criterion)이 적용될 수 있다.

[0074] L1 놈 최소화 알고리즘은 해당 신호에 대한 사전 정보를 이용하여, 고정된 개수의 신호를 관찰하여, 주어진 복구 신호의 질(해상도)을 향상시키는 것이다. 회소 표현이 행해진 다음, 다음 단계는  $y$ 로부터 회소 신호  $s$ 를 고유하게 복구하는 것이다.

[0075] 단지  $M(<N)$ 개의 원 스펙트럼 측정치들만이 주어짐에 따라, 수학적 5에 나타나있는  $N$  개의 미지수들이 추정될 필요가 있다. 선형 방정식의 불충분 시스템을 위한 유일하고 회소한 해들을 구하는데 L1 놈 최소화 기법이 사용될 수 있다.

[0076]  $y = D\Psi s + w$  의 신호 모델이 이용된다. 여기에서  $s$ 는  $K$  회소 신호이다.  $s$ 를 복구하기 위한 가장 강력한 접근 방안은, 측정치  $y$ 와 일관되는 회소 벡터  $s$ 를 찾는 것이다. 이것은 수학적 6과 같이 L0 놈 최소화 문제를 푸는 것에 이르게 된다.

**수학적 6**

[0077] 
$$\hat{s} = \min_s \|s\|_0 \text{ subject to } \|D\Psi s - y\|_2^2 \leq \varepsilon$$

[0078] 여기에서  $\|s\|_0$  오퍼레이터는  $s$ 의 비-제로 성분의 개수를 카운트하고,  $\varepsilon$ 는 사용자에게 의해 특정된 작은 양의 정수이다.

[0079] 그러나 수학적 6은 컴퓨터 연산이 다루기 힘든 것으로 알려져 있는 조합적 최적화 문제이다. 따라서, L1 놈 최소화 알고리즘은 수학적 6에서의 문제에 대한 다루기 쉬운 해결 방안을 제공할 수 있다.

[0080] 디지털 처리부(130)의 회소 신호 복구를 위한 L1 놈 최소화 알고리즘은 수학적 7과 같이 표현될 수 있다.

**수학적 7**

[0081] 
$$\hat{s} = \min_s \|s\|_1 \text{ subject to } \|D\Psi s - y\|_2^2 \leq \varepsilon$$

[0082] 최적의 추정치( $\hat{s}$ )를 찾기 위해, L1 놈 최소화 문제는 보통은 효과적으로 해를 구할 수 있는 선형 프로그램으로서 재구성될 수 있다.  $A = D\Psi$  로 지정하면, 수학적 7은 수학적 8로 풀어 쓸 수 있다.

**수학적 8**

[0083] 
$$\min_s \|s\|_1 + \frac{\lambda}{2} \|y - As\|_2^2$$

[0084] 여기에서,  $\lambda$ 는 비-음수 파라미터이다. 수학적 8에서 최소화를 비음수 제약 ( $s \geq 0$ )을 가지는 선형 프로그래밍 문제로서 구성할 수 있다. 여기에서 비음수 제약( $s \geq 0$ )이라는 것은 신호 스펙트럼이 비-음수(non-negative)라는 것이다.

[0085] 이것을 수학적 9로 나타낼 수 있다.

수학식 9

$$\min_{\mathbf{s}} \mathbf{I}^T \mathbf{s} \quad \text{subject to} \quad \|\mathbf{A}\mathbf{s} - \mathbf{y}\|_2^2 \leq \varepsilon, \quad \mathbf{s} \geq \mathbf{0}$$

최적의 신호 스펙트럼 추정을 구하기 위하여, 상기 수학식 9의 선형 프로그래밍 문제를 푸는 프리멀-듀얼 접근법(Primal-dual Approach)이라고 불리는 인테리어 포인트 메쏘드(interior point method)이 사용될 수 있다.

도 3은 실시예에 따른 L1 놈 최소화 알고리즘을 설명하기 위한 흐름도이다.

도 3을 참조하면, 일실시예에 따른 L1 놈 최소화 알고리즘은 초기값을 설정한다(S31). 초기값의 설정에는 프라 이멀 변수  $\mathbf{s}_{\lambda}^{(k)}$ , 듀얼 변수  $\mathbf{v}_{\lambda}^{(k)}$ , 반복 인덱스 k, 비-음수 파라메타  $\lambda$ 가 해당된다.

방향 벡터를 계산한다(S32). k-1번째, 방향 벡터들  $\Delta \mathbf{s}_{\lambda}^{(k-1)}$ ,  $\Delta \mathbf{v}_{\lambda}^{(k-1)}$ 은 다음 아래 수학식 10에 의해서 구해진다.

수학식 10

$$\Delta \mathbf{s}_{\lambda}^{(k-1)} = \left[ \left( \mathbf{s}^{(k-1)} \right)^{-1} \mathbf{V}^{(k-1)} + \lambda \mathbf{A}^T \mathbf{A} \right]^{-1} \left[ \lambda \mathbf{A}^T (\mathbf{y} - \mathbf{A} \mathbf{s}_{\lambda}^{(k-1)}) - \mathbf{1}_M \right]$$

$$\Delta \mathbf{v}_{\lambda}^{(k-1)} = \lambda \left( \mathbf{A}^T \mathbf{A} \Delta \mathbf{s}_{\lambda}^{(k-1)} - \mathbf{A}^T (\mathbf{y} - \mathbf{A} \mathbf{s}_{\lambda}^{(k-1)}) \right) - \mathbf{s}_{\lambda}^{(k-1)} + \mathbf{1}_M$$

$$\mathbf{S}^{(k)} = \begin{bmatrix} s_{\lambda,1}^{(k)} & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & s_{\lambda,M}^{(k)} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{V}^{(k)} = \begin{bmatrix} v_{\lambda,1}^{(k)} & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & v_{\lambda,M}^{(k)} \end{bmatrix}$$

여기에서,  $s_{\lambda,i}^{(k)}$ 는 벡터  $\mathbf{s}_{\lambda}^{(k)}$ 의 i번째 원소,  $v_{\lambda,i}^{(k)}$ 는 벡터  $\mathbf{v}_{\lambda}^{(k)}$ 의 i번째 원소이다. 첫번째로, 프라 이멀 변수의 방향 벡터인  $\Delta \mathbf{s}_{\lambda}^{(k-1)}$ 을 찾고 난 이후, 듀얼 변수의 방향 벡터  $\Delta \mathbf{v}_{\lambda}^{(k-1)}$ 를 찾는다.

그 다음, 스텝 크기를 계산한다(S33). 스텝 크기는 기본적으로 최적화 이론에서 사용되는 백트래킹 라인 서치(Backtracking Line Search) 기술을 이용하여 계산될 수 있다. 효율적으로 스텝 크기를 추정하기 위해서는, 초기 스텝 크기가 적절하게 계산이 되는 것이 좋다. 초기 스텝 크기는 수학식 11에 의해 결정된다.

수학식 11

$$\alpha_0^{(k-1)} = 0.99 \times \min(\alpha_1, \alpha_2)$$

$$\alpha_1 = \min_{i \in \{i | \Delta s_{\lambda,i}^{(k-1)} < 0\}} \left| s_{\lambda,i}^{(k-1)} / \Delta s_{\lambda,i}^{(k-1)} \right| \quad \text{그리고,} \quad \alpha_2 = \min_{i \in \{i | \Delta v_{\lambda,i}^{(k-1)} < 0\}} \left| v_{\lambda,i}^{(k-1)} / \Delta v_{\lambda,i}^{(k-1)} \right|$$

여기에서, 이다. 초기 스텝 크기가 정해진 이후에 는 수학식 12를 만족시키는 k-1번째 스텝 크기  $\alpha^{(k-1)}$ 를 얻어낸다.

수학식 12

$$\left\| \mathbf{F}_\lambda \left( \mathbf{s}_\lambda^{(k-1)}, \mathbf{v}_\lambda^{(k-1)} \right) \right\|_2^2 > \left\| \mathbf{F}_\lambda \left( \mathbf{s}_\lambda^{(k-1)} + \alpha^{(k-1)} \Delta \mathbf{s}_\lambda^{(k-1)}, \mathbf{v}_\lambda^{(k-1)} + \alpha^{(k-1)} \Delta \mathbf{v}_\lambda^{(k-1)} \right) \right\|_2^2$$

[0096]

[0097]

그 다음, 프라이멀 변수와 듀얼 변수를 업데이트한다(S34). k 번째 프라이멀 변수와 듀얼 변수는 수학식 13에 의해서 업데이트 된다.

수학식 13

$$\begin{aligned} \mathbf{s}_\lambda^{(k)} &= \mathbf{s}_\lambda^{(k-1)} + \alpha^{(k-1)} \Delta \mathbf{s}_\lambda^{(k-1)} \\ \mathbf{v}_\lambda^{(k)} &= \mathbf{v}_\lambda^{(k-1)} + \alpha^{(k-1)} \Delta \mathbf{v}_\lambda^{(k-1)} \end{aligned}$$

[0098]

[0099]

그 다음으로, 듀얼리티 갭이 기준치 이하인지 판단한다(S35). 듀얼리티 갭은 다음 아래 수학식 14에 표현된다.

수학식 14

$$\eta = \left| \mathbf{v}^T (-\mathbf{s}_\lambda) \right|$$

[0100]

[0101]

판단 결과, 듀얼리티 갭이 기준치 이하가 아니면 인덱스+1 과  $\lambda = \lambda^\rho$  을(여기에서  $\rho$  는 1보다 큰 상수) 수행하여 (S36) 다시 S32 단계 내지 S34 단계를 반복적으로 수행한다. 판단 결과, 듀얼리티 갭이 기준치 이하이면 추정된 광 스펙트럼 추정값으로 출력한다(S37).

[0102]

상기되는 과정을 통하여 최적의 추정치( $\hat{\mathbf{s}}$ )를 알아낼 수 있고, 이 추정치를 이용하여 원래의 광신호 스펙트럼을 복구해 낸다.

[0103]

한편, 이미 설명한 바와 같이 랜덤필터모듈(110)은 분광의 대상이 되는 전체 파장대역, 또는 적어도 어느 일부 영역에서 다수 개의 피크치를 가지는 필터로 정의될 수 있다. 바람직하게는, 전체 파장대역이다. 상기 랜덤필터 모듈은 회절격자(grating)에 기반하는 랜덤필터에 의해서 저편하게 구현될 수 있다. 상기 회절격자에 기반하는 랜덤필터는, 투명한 기관에 랜덤한 간격으로 제공되는 장홈의 형상으로 회절격자를 제공하는 것에 의해서 산업적으로 용이하게 달성될 수 있다. 상기 회절격자의 주기와 높이에 의해서 입력되는 원래 광신호의 파장별 투과율이 제어될 수 있다. 예를 들어, 1mm의 사이 간격에 500~1000개의 회절격자가 제공되어 있을 수 있다.

[0104]

상기 회절격자에 기반하는 랜덤필터로는, 모든 입사광이 어느 하나의 회절격자를 통과하도록 함으로써, 관심주파수 전역에 대한 필터로서의 기능을 수행할 수 있다. 또한 회절격자의 간격을 임의로 제공함으로써, 랜덤필터가 서로 다른 파장에 대한 투과율 사이의 상관관계를 낮게 유지할 수 있다.

[0105]

도 4는 실시예에 따른 랜덤필터모듈의 구성을 보이는 도면이다.

[0106]

도 4를 참조하면, 상기 랜덤필터모듈(110)은 광경로상의 상측에 놓이는 그레이팅필터(grating filter)(111)와, 광경로상의 하측에 놓이는 스퀈터링필터(scattering filter)(112)가 포함된다. 상기 그레이팅필터(111)와 상기 스퀈터링필터(112)는 모든 랜덤필터의 특징을 가질 수 있다.

[0107]

상세하게 상기 그레이팅필터(111)는 비정형의 다수의 회절격자가 제공된 상태에서 입사광을 회절시킨다. 입사광이 그레이팅필터에 의해서 회절되면, 투과율 함수가 부여되는 한편, 파장에 다른 굴절율의 차이에 의해서 무지개광으로 분리될 수 있다. 상기 스퀈터링필터(111)는 기관에 임의의 방향 및 임의의 길이로 제작되는 다수의 장홈이 제공되는 것에 의해서 제공될 수 있다. 따라서 어느 일측에는 적색의 회절광이 많이 투과되고, 다른 일측

에는 자색의 회절광이 많이 투과된다. 도 4를 참조하면 예를 들어 백색광원(100)에서 출사된 광이 상기 그레이팅필터(111)를 통과하면 왼쪽에는 적색이 오른쪽에는 자색이 치우치게 회절될 수 있는 것을 알 수 있다.

[0108] 이 상태에서는 광센서장치에, 예를 들어 도면을 기준으로 왼쪽에 놓이는 센서에는 적색광이 지나치게 입사하고, 도면을 기준으로 오른쪽에 놓이는 센서에는 자색광이 지나치게 입사할 수 있다. 이 경우에는 인접하는 광센서 간의 상관도가 높아지게 되므로 분광기의 해상도를 낮추는 문제점으로 작용할 수 있다.

[0109] 이와 같은 문제점을 극복하기 위하여, 상기 그레이팅필터(111)를 통과한 광은 스캐터링필터(112)를 다시 통과한 다음에 광센서장치(120)에 입사하도록 한다. 상기 스캐터링필터(112)는 빛을 산란시키는 작용을 수행한다. 상기 스캐터링필터(112)에서 적색광이 비교적 많이 입사되는 곳에서는, 상기 적색광이 상기 스캐터링필터(112)를 통과한 다음에는 다양한 곳으로 퍼질 수 있다. 예를 들어 스캐터링필터(112)의 황색광이 많이 입사하는 곳을 통과하는 황색광은, 원래 주황색광이나 원래 녹색광이 많이 입사하는 곳까지 산란하여 퍼질 수 있다. 따라서, 광센서장치(120)의 센서 간의 자기상관도가 낮아지는 이점을 기대할 수 있다. 결국 분광기의 해상도가 향상되는 이점을 얻을 수 있다.

[0110] 상기 랜덤필터모듈(110)은 랜덤필터이므로, 랜덤필터의 민감도 행렬(D)은 개별 측정에 의해서 구하여지거나, 미리 정하여진 형태로 복제되는 랜덤필터의 경우에는 복제되는 대상으로서 랜덤필터의 민감도 행렬(D)이 사용될 수 있다. 상기 민감도행렬의 각 원소는 특정파장에 대한 해당하는 필터의 투과율이 될 수 있다.

[0111] 상기 민감도 행렬(D)의 원소값은 상기 광센서장치(120)의 각 광센서에 대응되는 값의 형식을 취한다. 따라서 상기 민감도 행렬은, 파장 및 세기를 이미 알고 있는 다수의 광을 랜덤필터모듈(110)을 통과시켜서, 상기 광센서장치(120)의 각 광센서에서 감지되는 값을 측정하는 과정을 반복하는 것에 의해서 구할 수 있다. 더 상세하게, 상기 수학식 1을 참조할 때 빛의 상태를 이미 알고 있는 다수의 광을 상기 수학식 1의 x로 하고, 상기 랜덤필터모듈(110)을 통과시켜서 상기 광센서장치(120)에 감지되는 값을 상기 수학식 1의 y로 하고, 상기 과정을 다수회 반복하여 정보를 축적하고, 이들 정보를 최적화 알고리즘을 적용함으로써 수학식 1의 민감도 행렬(D)을 구할 수 있다. 상기되는 과정에 의해서 상기 랜덤필터모듈의 투과율을 검출할 수 있다.

[0112] 예를 들어, 필터의 개수를 40개로 하고, 이미 알고 있는 광의 개수를 255개로 하고, 스펙트럼요소의 수를 800개로 가정한다. 이때 상기 필터의 개수는 광센서장치(120)에 제공되는 광센서의 개수와 동일한 수로 모델링이 될 수 있다. 실제로 상기 랜덤필터모듈(110)에는 그레이팅필터(111)와 스캐터링필터(112) 두개가 직렬로 제공되어 있을 수 있다.

[0113] 이 경우에 상기 수학식 1에서  $X \in \mathbb{R}^{800 \times 255}$ 로서 255개의 광원이 800개의 스펙트럼요소에 대하여 행렬로 대응되어 있고,  $Y \in \mathbb{R}^{40 \times 255}$ 로서 255개의 광원이 40개의 필터(즉, 광센서)에 대한 응답이 행렬로 대응될 수 있다. 한편, 상기 민감도행렬 D를 추정함에 있어서는, 행렬X와 행렬Y의 행과 열이 불일치하므로 수도-인버스(Pseudo-inverse)를 적용하여  $D=Y \cdot \text{pinv}(X)$ 와 같은 방식으로 추정하여 구할 수 있다.

[0114] 상기 민감도행렬 D의 각 원소는 음의 값을 가질 수 없으므로, D의 각 원소로서 d는 영보다 크거나 같다는 제약 조건하에서 최적화를 수행할 수 있다.

**수학식 15**

$$\min_{d_i} \| X^T d_i^T - y_i^T \|^2, \text{ such that } d_i \geq 0$$

[0115]

[0116] 상기 수학식 15를 참조하면,  $d_i$ 가 영보다 크거나 같은 제약조건에서 최적화방법으로서 최소자승법으로 수행할 수 있다. 여기서  $d_i$ 는 D의 i번째 행벡터이고,  $y_i$ 는 Y의 i번째 행벡터이다.

[0117] 상기되는 과정을 통하여 민감도행렬 D를 추정할 수 있다.

[0118] 도 5는 상기되는 방법으로 추정된 1번째 필터와 12번째 필터와 24번째 필터의 파장별 투과율을 나타내는 도면이다. 도 5를 참조하면, 각 파장별로 투과율이 구하여지고, 서로 상관관계가 없는 다양한 랜덤필터가 구현되는 것을 확인할 수 있다.

[0119] 본 발명의 사상에 포함되는 실시예를 더 제시한다. 상기 스캐터링필터는 하나가 아니라 그 특성이 서로 다른 두 개가 병렬로 마련될 수도 있고, 상기 스캐터링필터의 하류 쪽에 스캐터링필터가 하나 더 제공될 수도 있다. 이때 각각의 스캐터링필터는 그 특성이 다르도록 할 수도 있다.

**산업상 이용가능성**

[0120] 본 발명에 따르면, 소형분광기에 사용되는 랜덤필터모듈을, 산업적으로 이용가능하고, 저렴한 가격으로 구현할 수 있는 효과가 있다. 또한, 관심주파수 전역에 대한 랜덤필터모듈을 제공하고, 각 광센서와 가상적으로 대응되는 랜덤필터의 투과율의 상관관계가 낮고, 서로 다른 파장에 대한 투과율 사이에 상관관계가 낮은 랜덤필터모듈을 제공할 수 있다. 따라서, 해상도가 높은 분광기를 얻을 수 있다.

[0121] 아울러, 랜덤필터모듈의 민감도행렬을 정확하게 추정할 수 있다.

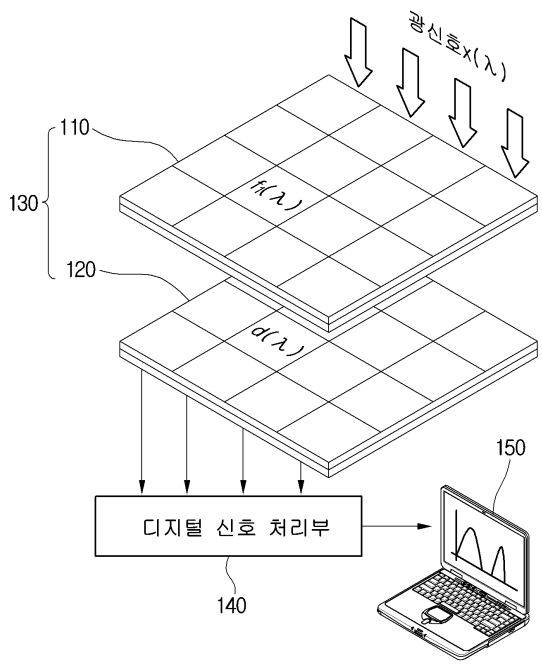
**부호의 설명**

[0122] 111: 그레이팅 필터

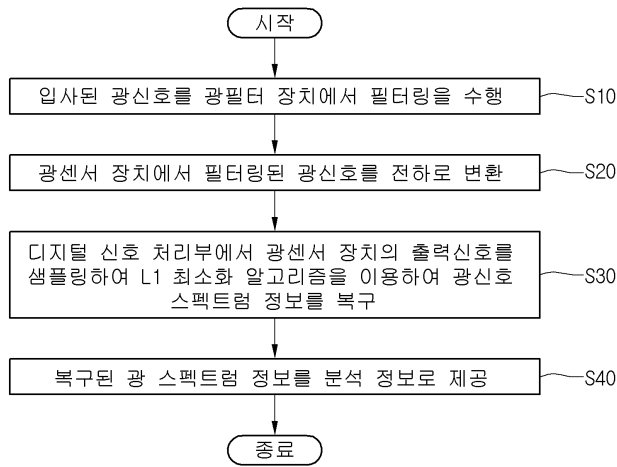
112: 스캐터링 필터

**도면**

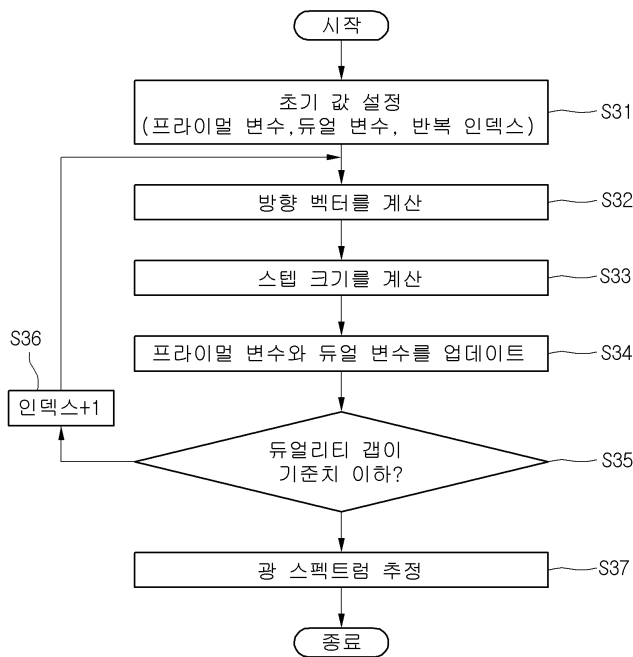
**도면1**



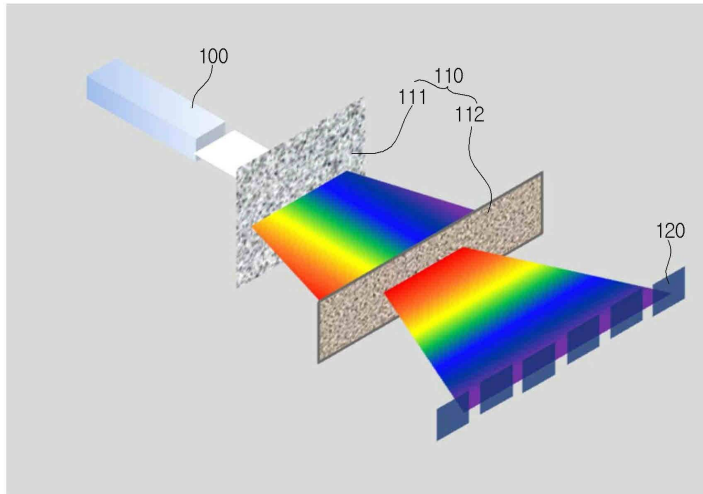
도면2



도면3



도면4



도면5

