



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2021-0087860
(43) 공개일자 2021년07월13일

- | | |
|--|---|
| <p>(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
 <i>G01N 21/17</i> (2006.01) <i>A61B 5/00</i> (2021.01)
 <i>G01N 29/34</i> (2006.01) <i>G01N 29/46</i> (2006.01)</p> <p>(52) CPC특허분류
 <i>G01N 21/1702</i> (2013.01)
 <i>A61B 5/0095</i> (2013.01)</p> <p>(21) 출원번호 10-2020-0047924
 (22) 출원일자 2020년04월21일
 심사청구일자 2020년04월21일</p> <p>(30) 우선권주장
 1020200000594 2020년01월03일 대한민국(KR)</p> | <p>(71) 출원인
 한밭대학교 산학협력단
 대전광역시 유성구 동서대로 125 (덕명동)</p> <p>(72) 발명자
 강동열
 대전광역시 유성구 은구비남로 34
 열매마을아파트8단지새미래 809-601</p> <p>(74) 대리인
 특허법인 플러스</p> |
|--|---|

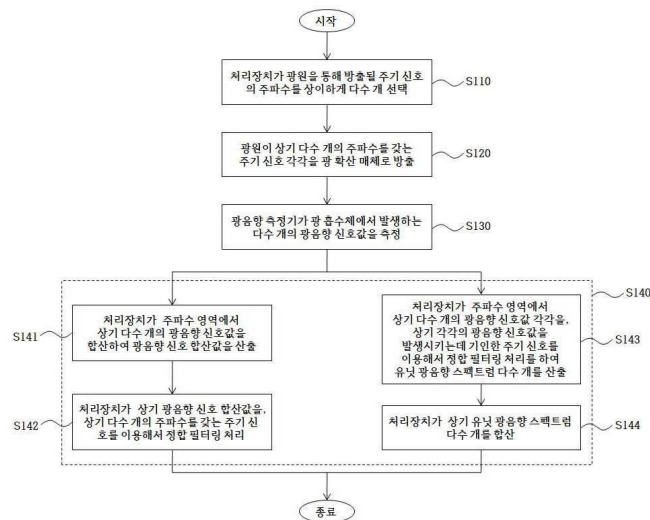
전체 청구항 수 : 총 10 항

(54) 발명의 명칭 주파수 영역 광음향 측정에서 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 향상시키는 방법

(57) 요약

본 발명에 의하면, 다수 개의 주기 신호 또는 다수 개의 처프 신호를 광 흡수체에 흡수시키고, 상기 광 흡수체에서 발생하여 광음향 측정기로 측정되는 광음향 신호를, 처리장치가 주파수 영역에서 결맞음 합산 방법 또는 비결맞음 합산 방법을 이용해서 정합 필터링 처리를 하도록 구성됨에 따라, 상기 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 향상시킬 수 있게 된다.

대표도



(52) CPC특허분류

G01N 29/348 (2013.01)

G01N 29/46 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1345317715
과제번호	2017R1D1A1B04035675
부처명	교육부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	개인기초연구(교육부)(R&D)
연구과제명	노이즈 광음향 컴퓨터 탐지에서 머신러닝과 모델 관측자 기법의 상호 비교 및 융합
적용을 통한 성능 향상 및	최적화
기 여 율	1/1
과제수행기관명	한밭대학교
연구기간	2017.06.01 ~ 2021.05.31

명세서

청구범위

청구항 1

- (a) 처리장치가 광원을 통해 방출될 주기 신호의 주파수를 상이하게 다수 개 선택하는 단계;
- (b) 상기 광원이 상기 처리장치에 의해 선택된 다수 개의 주파수를 갖는 주기 신호 각각을 광 확산 매체로 방출하여, 상기 광 확산 매체의 내부에 위치하는 광 흡수체에 흡수시키는 단계;
- (c) 상기 다수 개의 주파수를 갖는 주기 신호 각각이 상기 광 흡수체에 흡수됨에 따라 발생하는 다수 개의 광음향 신호를 광음향 측정기가 측정하는 단계; 및
- (d) 상기 처리장치가 상기 광음향 측정기에 의해 측정된 다수 개의 광음향 신호를 주파수 영역에서 처리하는 단계;를 포함하는 주파수 영역 광음향 측정에서 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 향상시키는 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 (d) 단계는,

- (d11) 상기 주파수 영역에서 상기 다수 개의 광음향 신호를 합산하여 광음향 신호 합산값을 산출하는 단계; 및
- (d12) 상기 광음향 신호 합산값을, 상기 다수 개의 주파수를 갖는 주기 신호를 이용해서 정합 필터링 처리하는 단계;를 포함하는 주파수 영역 광음향 측정에서 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 향상시키는 방법.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 (d12) 단계는,

상기 주파수 영역에서 상기 다수 개의 주파수를 갖는 주기 신호 각각의 컨จู게이트값을 합산한 주기 신호의 컨จู게이트 합산값에 의해, 상기 광음향 신호 합산값의 정합 필터링 처리가 이루어지는 것을 특징으로 하는 주파수 영역 광음향 측정에서 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 향상시키는 방법.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 (d) 단계는,

- (d21) 상기 주파수 영역에서 상기 다수 개의 광음향 신호 각각을, 상기 각각의 광음향 신호를 발생시키는데 기인한 상기 주기 신호를 이용해서 정합 필터링 처리를 하여 유닛 광음향 스펙트럼 다수 개를 산출하는 단계; 및
- (d22) 상기 유닛 광음향 스펙트럼 다수 개를 합산하는 단계;를 포함하는 주파수 영역 광음향 측정에서 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 향상시키는 방법.

청구항 5

제4항에 있어서,

상기 (d21) 단계는,

상기 주파수 영역에서 상기 각각의 광음향 신호를 발생시키는데 기인한 상기 주기 신호의 권주게이트값에 의해, 상기 각각의 광음향 신호의 정합 필터링 처리가 이루어지는 것을 특징으로 하는 주파수 영역 광음향 측정에서 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 향상시키는 방법.

청구항 6

- (a') 처리장치가 광원을 통해 방출될 처프 신호의 주파수 범위를 상이하게 다수 개 선택하는 단계;
- (b') 상기 광원이 상기 처리장치에 의해 선택된 다수 개의 주파수 범위를 갖는 처프 신호 각각을 광 확산 매체로 방출하여, 상기 광 확산 매체의 내부에 위치하는 광 흡수체에 흡수시키는 단계;
- (c') 상기 다수 개의 주파수 범위를 갖는 처프 신호 각각이 상기 광 흡수체에 흡수됨에 따라 발생하는 다수 개의 광음향 신호를 광음향 측정기가 측정하는 단계; 및
- (d') 상기 처리장치가 상기 광음향 측정기에 의해 측정된 다수 개의 광음향 신호를 주파수 영역에서 처리하는 단계;를 포함하는 주파수 영역 광음향 측정에서 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 향상시키는 방법.

청구항 7

- 제6항에 있어서,
- 상기 (d') 단계는,
- (d11') 상기 주파수 영역에서 상기 다수 개의 광음향 신호를 합산하여 광음향 신호 합산값을 산출하는 단계; 및
- (d12') 상기 광음향 신호 합산값을, 상기 다수 개의 주파수 범위를 갖는 처프 신호를 이용해서 정합 필터링 처리하는 단계;를 포함하는 주파수 영역 광음향 측정에서 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 향상시키는 방법.

청구항 8

- 제7항에 있어서,
- 상기 (d12') 단계는,
- 상기 주파수 영역에서 상기 다수 개의 주파수 범위를 갖는 처프 신호 각각의 권주게이트값을 합산한 처프 신호의 권주게이트 합산값에 의해, 상기 광음향 신호 합산값의 정합 필터링 처리가 이루어지는 것을 특징으로 하는 주파수 영역 광음향 측정에서 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 향상시키는 방법.

청구항 9

- 제6항에 있어서,
- 상기 (d') 단계는,
- (d21') 상기 주파수 영역에서 상기 다수 개의 광음향 신호 각각을, 상기 각각의 광음향 신호를 발생시키는데 기인한 상기 처프 신호를 이용해서 정합 필터링 처리를 하여 유닛 광음향 스펙트럼 다수 개를 산출하는 단계; 및
- (d22') 상기 유닛 광음향 스펙트럼 다수 개를 합산하는 단계;를 포함하는 주파수 영역 광음향 측정에서 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 향상시키는 방법.

청구항 10

- 제9항에 있어서,
- 상기 (d21') 단계는,

상기 주파수 영역에서 상기 각각의 광음향 신호를 발생시키는데 기인한 상기 처프 신호의 권중게이트값에 의해, 상기 각각의 광음향 신호의 정합 필터링 처리가 이루어지는 것을 특징으로 하는 주파수 영역 광음향 측정에서 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 향상시키는 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 광 흡수체의 위치나 특성 등을 파악하기 위해서 광 흡수체에 입사빔을 흡수시키는 경우에, 상기 광 흡수체에서 발생하여 광음향 측정기로 측정되는 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 향상시킬 수 있는 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 일반적인 광음향 측정에서는, 광 확산 매체(예를 들어, 생체 조직 등)의 내부에 위치하는 광 흡수체(예를 들어, 혈관, 종양 등)의 위치나 특성 등을 파악하기 위해서, 광 확산 매체의 외부에 위치하는 광원을 통해 입사빔을 방출시켜 광 확산 매체에 조사한다. 광 확산 매체에 조사되는 입사빔은 광 확산 매체 내부에서 산란이 일어나게 되며, 이에 따라 광 흡수체에는 입사빔 중 일부만이 흡수되게 된다.

[0003] 광원을 통해 방출되는 입사빔의 세기가 시간에 따라 변하게 되면, 상기 입사빔을 흡수하는 광 흡수체는 열 팽창 현상으로 인해 물리적으로 팽창과 수축을 반복하게 되고, 이 과정에서 광 흡수체에서는 광음향 신호(예를 들어, 초음파 신호)가 발생하게 된다. 광음향 측정에서는, 이와 같이 광 흡수체에서 발생하는 광음향 신호를 광 확산 매체의 외부에 위치하는 광음향 측정기로 측정하며, 상기 광음향 측정기에 의해 측정된 광음향 신호를 처리장치를 통해 처리함으로써 광 흡수체의 위치나 특성 등을 파악하는데 이용한다.

[0004] 광 흡수체에서 발생하는 광음향 신호의 세기는 광 흡수체의 광 흡수계수, 그리고 상기 광 흡수체에 도달하는 입사빔의 세기에 각각 비례한다. 다만, 광원을 통해 방출되는 입사빔의 세기는 제한적이고, 광 확산 매체 내부에서는 산란 등으로 인해 입사빔의 세기가 지수함수적으로 감소하기 때문에, 광 흡수체에서 발생하는 광음향 신호의 세기는 매우 미약하다. 또한, 광음향 측정 시, 열에 의한 광음향 잡음(즉, 광음향 열 잡음)이 항상 존재하기 마련이며, 광 흡수체에서 발생된 광음향 신호가 광 확산 매체의 경계면이나 다른 광 흡수체에 의해 반사나 굴절되는 클러터(clutter) 형태의 광음향 잡음도 항상 존재하기 마련이다. 따라서, 통상적인 광음향 측정에서는 광음향 측정기로 측정되는 광음향 신호의 신호 대 잡음비가 매우 낮으며, 이는 고해상도와 초민감도의 광음향 신호 및 영상 정보를 획득하는데 있어서 커다란 장애물이 된다.

[0005] 광 확산 매체의 외부에 위치하는 광원에서 방출되는 입사빔의 형태는 크게 펄스 신호와, 시간에 따라 입사빔의 세기가 연속적으로 변하는 신호(이하, '연속적으로 변하는 신호'라 함)로 나눌 수 있다.

[0006] 우선, 광원에서 방출되는 입사빔으로서 펄스 신호를 사용하게 되면, 연속적으로 변하는 신호를 사용하는 경우에 비해, 광음향 측정기로 측정되는 광음향 신호의 신호 대 잡음비가 높다. 이 높은 신호 대 잡음비 특성 때문에 지금까지 거의 모든 광음향 측정의 응용 분야들에서는 광원에서 방출되는 입사빔으로서 펄스 신호를 사용해왔다. 하지만 분광학적 광음향 측정을 위해 파장 가변형의 펄스 신호를 생성하는 OPO(Optical Parametric Oscillator) 등의 레이저는 크기가 클 뿐만 아니라 가격도 매우 고가이다. 더구나 이와 같은 레이저의 펄스 반복률(repetition rate)은 통상 수십 Hz 정도에 불과하기 때문에, 광 확산 매체 또는 광 흡수체의 실시간 모니터링과 같은 빠른 측정이 매우 어렵다는 문제점이 있다.

[0007] 이에 반해, 광원에서 방출되는 입사빔으로서 연속적으로 변하는 신호를 사용하게 되면, 기존의 저가 및 소형의 레이저 다이오드를 광원으로 이용할 수 있다. 그리고 이러한 레이저 다이오드는 구현 가능한 파장대가 매우 넓고, 동작 속도 또한 매우 빠르기 때문에, 광 확산 매체 또는 광 흡수체의 실시간 모니터링과 같은 빠른 측정이 가능한 이점이 있다.

[0008] 연속적으로 변하는 신호의 가장 간단한 형태는 정현파 신호이다. 다만, 정현파 신호는 펄스 신호에 비해 광음향 측정기로 측정되는 광음향 신호의 신호 대 잡음비가 낮을 뿐만 아니라, 광 확산 매체의 내부에 위치하는 광 흡수체의 위치를 정확하게 파악해내기 어렵다는 단점이 있다.

[0009] 이러한 단점을 보완하기 위해 최근 들어 연속적으로 변하는 신호의 형태 중 하나인 처프(chirp) 신호를 광음향

측정에 사용하는 것이 고려되었다. 광원에서 방출되는 입사빔으로서 처프 신호를 사용하게 되면, 광음향 측정기로 측정되는 광음향 신호의 신호 대 잡음비가 정현파 신호를 사용하는 경우에 비해 향상될 뿐만 아니라, 광 흡수체의 위치 역시 비교적 정확하게 파악해낼 수 있다. 하지만 이와 같이 입사빔으로서 처프 신호를 사용하는 경우와 하더라도, 입사빔으로서 펄스 신호를 사용하는 경우에 비해서는 광음향 측정기로 측정되는 광음향 신호의 신호 대 잡음비가 적어도 20~40dB 정도 낮다는 문제점이 있다.

선행기술문헌

특허문헌

[0010] (특허문헌 0001) 한국 등록특허공보 제1730816호(2017.04.21)

발명의 내용

해결하려는 과제

[0011] 본 발명은 상술한 바와 같은 문제점을 해결하기 위해 안출된 것으로서, 연속적으로 변하는 신호를 광 확산 매체에 조사되는 입사빔으로 사용함으로써, 저가 및 소형의 광원을 이용할 수 있도록 하고, 광 확산 매체 또는 광 흡수체의 실시간 모니터링과 같은 빠른 측정이 가능하도록 함과 동시에, 광음향 측정기로 측정되는 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 향상시킬 수 있는 방법을 제공하는 것에 그 목적이 있다.

과제의 해결 수단

[0012] 상기와 같은 목적을 달성하기 위하여, 본 발명의 제1 실시예에 따른 주파수 영역 광음향 측정에서 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 향상시키는 방법은, (a) 처리장치가 광원을 통해 방출될 주기 신호(예를 들어, 정현파 신호, 구형파 신호 또는 톱니파 신호 등)의 주파수를 상이하게 다수 개 선택하는 단계; (b) 상기 광원이 상기 처리장치에 의해 선택된 다수 개의 주파수를 갖는 주기 신호 각각을 광 확산 매체로 방출하여, 상기 광 확산 매체의 내부에 위치하는 광 흡수체에 흡수시키는 단계; (c) 상기 다수 개의 주파수를 갖는 주기 신호 각각이 상기 광 흡수체에 흡수됨에 따라 발생하는 다수 개의 광음향 신호를 광음향 측정기가 측정하는 단계; 및 (d) 상기 처리장치가 상기 광음향 측정기에 의해 측정된 다수 개의 광음향 신호를 주파수 영역에서 처리하는 단계를 포함한다.

[0013] 여기서, 상기 (d) 단계는, (d11) 상기 주파수 영역에서 상기 다수 개의 광음향 신호를 합산하여 광음향 신호 합산값을 산출하는 단계; 및 (d12) 상기 광음향 신호 합산값을, 상기 다수 개의 주파수를 갖는 주기 신호를 이용하여 정합 필터링 처리하는 단계를 포함할 수 있다.

[0014] 여기서, (d12) 단계는, 상기 주파수 영역에서 상기 다수 개의 주파수를 갖는 주기 신호 각각의 컨쥬게이트값을 합산한 주기 신호의 컨쥬게이트 합산값에 의해, 상기 광음향 신호 합산값의 정합 필터링 처리가 이루어지는 것일 수 있다.

[0015] 또는, 상기 (d) 단계는, (d21) 상기 주파수 영역에서 상기 다수 개의 광음향 신호 각각을, 상기 각각의 광음향 신호를 발생시키는데 기인한 상기 주기 신호를 이용해서 정합 필터링 처리를 하여 유닛 광음향 스펙트럼 다수 개를 산출하는 단계; 및 (d22) 상기 유닛 광음향 스펙트럼 다수 개를 합산하는 단계를 포함할 수 있다.

[0016] 여기서, 상기 (d21) 단계는, 상기 주파수 영역에서 상기 각각의 광음향 신호를 발생시키는데 기인한 상기 주기 신호의 컨쥬게이트값에 의해, 상기 각각의 광음향 신호의 정합 필터링 처리가 이루어지는 것일 수 있다.

[0017] 또한, 상기와 같은 목적을 달성하기 위하여, 본 발명의 제2 실시예에 따른 주파수 영역 광음향 측정에서 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 향상시키는 방법은, (a') 처리장치가 광원을 통해 방출될 처프 신호의 주파수 범위를 상이하게 다수 개 선택하는 단계; (b') 상기 광원이 상기 처리장치에 의해 선택된 다수 개의 주파수 범위를 갖는 처프 신호 각각을 광 확산 매체로 방출하여, 상기 광 확산 매체의 내부에 위치하는 광 흡수체에 흡수시키는 단계; (c') 상기 다수 개의 주파수 범위를 갖는 처프 신호 각각이 상기 광 흡수체에 흡수됨에 따라 발생하는 다수 개의 광음향 신호를 광음향 측정기가 측정하는 단계; 및 (d') 상기 처리장치가 상기 광음향 측정기에 의해 측정된 다수 개의 광음향 신호를 주파수 영역에서 처리하는 단계를 포함한다.

[0018] 여기서, 상기 (d') 단계는, (d11') 상기 주파수 영역에서 상기 다수 개의 광음향 신호를 합산하여 광음향 신호

합산값을 산출하는 단계; 및 (d12') 상기 광음향 신호 합산값을, 상기 다수 개의 주파수 범위를 갖는 처프 신호를 이용해서 정합 필터링 처리하는 단계를 포함할 수 있다.

[0019] 여기서, 상기 (d12') 단계는, 상기 주파수 영역에서 상기 다수 개의 주파수 범위를 갖는 처프 신호 각각의 컨จู게이트값을 합산한 처프 신호의 컨จู게이트 합산값에 의해, 상기 광음향 신호 합산값의 정합 필터링 처리가 이루어지는 것일 수 있다.

[0020] 또는, 상기 (d') 단계는, (d21') 상기 주파수 영역에서 상기 다수 개의 광음향 신호 각각을, 상기 각각의 광음향 신호를 발생시키는데 기인한 상기 처프 신호를 이용해서 정합 필터링 처리를 하여 유닛 광음향 스펙트럼 다수 개를 산출하는 단계; 및 (d22') 상기 유닛 광음향 스펙트럼 다수 개를 합산하는 단계를 포함할 수 있다.

[0021] 여기서, 상기 (d21') 단계는, 상기 주파수 영역에서 상기 각각의 광음향 신호를 발생시키는데 기인한 상기 처프 신호의 컨จู게이트값에 의해, 상기 각각의 광음향 신호의 정합 필터링 처리가 이루어지는 것일 수 있다.

발명의 효과

[0022] 본 발명에 의하면, 연속적으로 변하는 신호인 주기 신호 또는 처프 신호를 광 확산 매체에 조사되는 입사빔으로 사용하도록 구성됨에 따라, 저가 및 소형의 광원을 이용할 수 있고, 광 확산 매체 또는 광 흡수체의 실시간 모니터링과 같은 빠른 측정이 가능하다는 이점이 있다.

[0023] 또한, 본 발명에 의하면, 다수 개의 주기 신호 또는 다수 개의 처프 신호를 광 흡수체에 흡수시키고, 상기 광 흡수체에서 발생하여 광음향 측정기로 측정되는 광음향 신호를 처리장치가 주파수 영역에서 처리(구체적으로는, 결맞음 합산 방법 또는 비결맞음 합산 방법을 이용해서 정합 필터링 처리)하도록 구성됨에 따라, 상기 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 향상시킬 수 있는 이점이 있다.

도면의 간단한 설명

[0024] 도 1은 본 발명에 따른 주파수 영역 광음향 측정에서 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 향상시키는 방법을 실현하는 시스템의 개략도이다.

도 2는 중심 주파수가 3MHz인 광음향 측정기의 전달 함수 $\tilde{T}(\nu)$ 의 특성을 나타낸 도면이다.

도 3은 초점 거리가 20mm이고, 개구수(NA)가 0.35인 구면 초점을 갖는 광음향 측정기로 반지름이 2mm인 구형 광 흡수체(20)를 측정한 경우에, 광음향 측정기의 모양 및 광 흡수체의 모양에 따라 결정되는 공간적 광음향 스펙트럼 $\tilde{O}(\nu)$ 를 나타낸 도면이다.

도 4a 및 도 4b는 수학적 식 10에 따른 처프 신호를 개략적으로 나타낸 그래프이다.

도 5a 및 도 5b는 수학적 식 11에 따른 정현파 신호를 개략적으로 나타낸 그래프이다.

도 6은 주파수가 1MHz인 정현파 신호, 구형파 신호 및 톱니파 신호를 나타낸 그래프이다.

도 7은 광원을 통해 방출되는 처프 신호의 선폭 T가 0.25~1.5msec일 때, 광음향 측정기로 측정되는 광음향 신호의 신호 대 잡음비와, 상기 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 평균한 결과를 나타낸 도면이다.

도 8a는 선폭 T=250 μ sec일 때 주파수가 1MHz에서 5MHz까지 변하는 처프 신호가 광 흡수체에 흡수될 경우, 광음향 측정기로 측정되는 광음향 신호를 처리장치가 $\tilde{Q}(\nu) = \tilde{T}^*(\nu)$ 로 정합 필터링을 하였을 때, 잡음이 포함되지 않은 이상적인 광음향 신호를 나타낸 도면이다.

도 8b는 선폭 T=250 μ sec일 때 주파수가 1MHz에서 5MHz까지 변하는 처프 신호가 광 흡수체에 흡수될 경우, 광음향 측정기로 측정되는 광음향 신호를 처리장치가 $\tilde{Q}(\nu) = \tilde{T}^*(\nu)$ 로 정합 필터링을 하였을 때, 잡음이 포함된 광음향 신호를 나타낸 도면이다.

도 9는 본 발명의 제1 실시예에 따른 주파수 영역 광음향 측정에서 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 향상시키는 방법의 흐름도이다.

도 10은 다수 개의 상이한 주파수를 갖는 정현파 신호를 광 흡수체에 흡수시킨 뒤, 결맞음 합산 방법으로 획득한 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 나타낸 도면이다.

도 11은 다수 개의 상이한 주파수를 갖는 정현파 신호를 광 흡수체에 흡수시킨 뒤, 비결맞음 합산 방법으로 획득

특한 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 나타낸 도면이다.

도 12a는 선폭 $T=20\ \mu\text{sec}$ 인 경우에 대해 결맞음 합산 방법으로 계산된 잡음이 없는 이상적인 광음향 신호를 나타낸 도면이다.

도 12b는 선폭 $T=20\ \mu\text{sec}$ 인 경우에 대해 결맞음 합산 방법으로 계산된 잡음이 포함된 광음향 신호를 나타낸 도면이다.

도 13a는 선폭 $T=20\ \mu\text{sec}$ 인 경우에 대해 비결맞음 합산 방법으로 계산된 잡음이 없는 이상적인 광음향 신호를 나타낸 도면이다.

도 13b는 선폭 $T=20\ \mu\text{sec}$ 인 경우에 대해 비결맞음 합산 방법으로 계산된 잡음이 포함된 광음향 신호를 나타낸 도면이다.

도 14는 다수 개의 상이한 주파수를 갖는 구형파 신호를 광 흡수체에 흡수시킨 뒤, 결맞음 합산 방법으로 획득한 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 나타낸 도면이다.

도 15는 다수 개의 상이한 주파수를 갖는 구형파 신호를 광 흡수체에 흡수시킨 뒤, 비결맞음 합산 방법으로 획득한 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 나타낸 도면이다.

도 16은 다수 개의 상이한 주파수를 갖는 톱니파 신호를 광 흡수체에 흡수시킨 뒤, 결맞음 합산 방법으로 획득한 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 나타낸 도면이다.

도 17은 다수 개의 상이한 주파수를 갖는 톱니파 신호를 광 흡수체에 흡수시킨 뒤, 비결맞음 합산 방법으로 획득한 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 나타낸 도면이다.

도 18은 본 발명의 제2 실시예에 따른 주파수 영역 광음향 측정에서 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 향상시키는 방법의 흐름도이다.

도 19는 다수 개의 상이한 주파수 범위를 갖는 처프 신호를 광 흡수체에 흡수시킨 뒤, 결맞음 합산 방법으로 획득한 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 나타낸 도면이다.

도 20은 다수 개의 상이한 주파수 범위를 갖는 처프 신호를 광 흡수체에 흡수시킨 뒤, 비결맞음 합산 방법으로 획득한 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 나타낸 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0025] 이하, 첨부한 도면들을 참조하여 본 발명에 따른 주파수 영역 광음향 측정에서 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 향상시키는 방법에 대해 상세하게 설명한다. 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있는 공지 기능 및 구성에 대해서는 그 상세한 설명을 생략하기로 한다.
- [0026] 도 1은 본 발명에 따른 주파수 영역 광음향 측정에서 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 향상시키는 방법을 실현하는 시스템의 개략도로서, 상기 시스템은 광원(100), 광음향 측정기(200) 및 처리장치(300)를 포함하여 이루어질 수 있다.
- [0027] 광원(100)에서는 광 확산 매체(10)로 입사빔을 방출하며, 상기 입사빔은 후술하는 바와 같이 주기 신호 또는 처프 신호일 수 있다.
- [0028] 광원(100)에서 광 확산 매체(10)로 방출되는 입사빔은 광 확산 매체(10) 내에서 전파 및 확산되며, 광 확산 매체(10)의 유효산란계수(μ_{eff})에 의해 그 세기가 지수적으로 감쇄되면서 광 흡수체(20)에 도달하게 된다.
- [0029] 광원(100)에서 주기 신호 또는 처프 신호와 같은 입사빔이 방출될 경우 그 입사빔의 세기는 시간에 따라 변하게 된다. 광 확산 매체(10)로 방출되는 입사빔은 광 확산 매체(10)의 내부에 위치하는 광 흡수체(20)에 흡수된다. 광 흡수체(20)는 입사빔을 흡수함에 따라 열 팽창 현상으로 인해 물리적으로 팽창과 수축을 반복하게 되며, 이 과정에서 광음향 신호(예를 들어, 초음파 신호)를 발생시키게 된다.
- [0030] 광음향 측정기(200)는 광 확산 매체(10)의 외부에 위치하며, 광 흡수체(20)에서 발생하는 광음향 신호를 측정한다. 광음향 측정기(200)가 측정하는 광음향 신호에는 광 흡수체(20)에서 발생하는 이상적인 광음향 신호(즉, 잡음이 포함되어 있지 않은 광음향 신호를 의미함)와 잡음값(즉, 후술하는 광음향 잡음값을 의미함)이 혼합되어 있다.

[0031] 광원(100)에서 광 확산 매체(10)로 $I(t)$ 의 세기를 갖는 입사빔이 방출될 경우, 광 확산 매체(10)의 내부에 위치하는 광 흡수체(20)에 흡수되는 광 에너지의 공간적 분포가 $H(\vec{r}_o)$ 로 나타난다고 가정하기로 한다. 상기 광 흡수체(20)에 흡수되는 광 에너지의 공간적 분포 $H(\vec{r}_o)$ 에서 $\vec{r}_o$ 는 광 확산 매체(10)의 임의의 원점(도 1의 ○)에서 광 흡수체(20)까지의 벡터를 나타낸다.

[0032] 그리고 광 확산 매체(10)의 외부에 위치하며, 구면 초점을 갖는 광음향 측정기(200)의 표면 분포 함수를 $D(\vec{r}_d)$ 라고 가정하기로 한다. 상기 광음향 측정기(200)의 표면 분포 함수 $D(\vec{r}_d)$ 에서 $\vec{r}_d$ 는 광 확산 매체(10)의 임의의 원점(도 1의 ○)에서 광음향 측정기(200) 표면까지의 벡터를 나타낸다.

[0033] 광 흡수체(20)에서 발생하여 광음향 측정기(200)에 의해 측정되는 광음향 신호 $g(t)$ 는 헬름홀츠(Helmholtz) 방정식의 그린(Green) 함수의 해에 의해 다음의 수학적 식 1과 같이 나타낼 수 있다.

[0034] [수학적 식 1]

$$g(t) = \frac{\Gamma}{4\pi c_s^2} \int D(\vec{r}_d) \int d^3 r_o \frac{1}{|\vec{r}_d - \vec{r}_o|} H(\vec{r}_o) \frac{\partial}{\partial t} I(t - \frac{|\vec{r}_d - \vec{r}_o|}{c_s}) d^3 r_d$$

[0035]

[0036] 수학적 식 1에서 Γ 는 그루나이젠 상수이고, c_s 는 초음파의 속력이다. 이하의 시뮬레이션에서는 통상적인 생체 조직(광 확산 매체)을 고려하여 Γ 를 0.24, c_s 를 1500m/s로 정하였다. 또한, 수학적 식 1에서 $d^3 r_o$ 는 광 확산 매체(10)의 임의의 원점(도 1의 ○)에서 광 흡수체(20)까지의 3차원 적분을 위한 적분 기호이고, $d^3 r_d$ 는 광 확산 매체(10)의 임의의 원점(도 1의 ○)에서 광음향 측정기(200) 표면까지의 3차원 적분을 위한 적분 기호이다.

[0037] 수학적 식 1에서 광 흡수체(20)에 흡수되는 광 에너지의 공간적 분포 $H(\vec{r}_o)$ 는 다음의 수학적 식 2와 같이 나타낼 수 있다.

[0038] [수학적 식 2]

$$H(\vec{r}_o) = \exp(-\mu_a z) PO(\vec{r}_o)$$

[0039]

[0040] 수학적 식 2에서 μ_a 는 광 흡수체(20)의 광 흡수 계수이고, $PO(\vec{r}_o)$ 는 공간적으로 분포한 광 흡수체(20)를 나타내는 함수로서, 이하의 시뮬레이션에서는 광 흡수체(20)를 반지름이 2mm인 구형으로 가정하였다. 수학적 식 2에 나타낸 바와 같이, 광 흡수 분포는 광 확산 매체(10)에 조사되는 입사빔이 광 확산 매체(10)에 의해 산란되기 때문에, 광 확산 매체(10)의 깊이 z 에 따라 지수함수적으로 감소한다고 가정하였다.

[0041] 수학적 식 1에서 입사빔의 세기 $I(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{I}(\nu) \exp(2\pi i \nu t) d\nu$ 임을 고려하면, 수학적 식 1은 다음의 수학적 식 3과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, $\tilde{I}(\nu)$ 는 입사빔의 세기 $I(t)$ 를 주파수 영역에서 푸리에 변환한 입사빔 스펙트럼이고, ν 는 주파수를, t 는 시간을 각각 나타낸다.

[0042] [수학적 식 3]

$$g(t) = \frac{\Gamma}{4\pi c_s^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} D(\vec{r}_d) H(\vec{r}_o) \frac{\exp(-ik|\vec{r}_d - \vec{r}_o|)}{|\vec{r}_d - \vec{r}_o|} d^3 r_o d^3 r_d [(2\pi i \nu) \tilde{I}(\nu) e^{2\pi i \nu t}] d\nu$$

[0043]

[0044] 광음향 측정기(200)의 전달 함수를 $\tilde{T}(\nu)$ 라 하고, 수학적 식 3의 광음향 신호 $g(t)$ 를 주파수 영역에서 나타내면, 다음의 수학적 식 4와 같은 광음향 신호의 스펙트럼(즉, 광음향 스펙트럼) $\tilde{G}(\nu)$ 를 획득할 수 있다.

[0045] [수학식 4]

$$\begin{aligned}\bar{G}(\nu) &= \bar{I}(\nu) \frac{\Gamma}{4\pi c_s^2} \left[\int_{\infty} \int_{\infty} D(\vec{r}_d) H(\vec{r}_o) \frac{\exp(-ik|\vec{r}_d - \vec{r}_o|)}{|\vec{r}_d - \vec{r}_o|} d^3 r_o d^3 r_d \right] (2\pi i \nu) \bar{I}(\nu) \\ &= \bar{I}(\nu) \bar{I}(\nu) \int_{\infty} H(\vec{r}_o) K(\vec{r}_o, \nu) d^3 r_o\end{aligned}$$

[0046]

[0047] 수학식 4에 나타난 바와 같이, 광음향 측정기(200)에 의해 측정되는 광음향 신호의 스펙트럼에는 광음향 측정기(200)의 전달 함수 $\bar{I}(\nu)$ 가 곱해져야 한다.

[0048] 그리고 수학식 4에서 $K(\vec{r}_o, \nu)$ 는 다음의 수학식 5와 같이 정의하였다.

[0049] [수학식 5]

$$K(\vec{r}_o, \nu) = \frac{i\nu\Gamma}{2c_s^2} \int_{\infty} D(\vec{r}_d) \frac{\exp(-ik|\vec{r}_d - \vec{r}_o|)}{|\vec{r}_d - \vec{r}_o|} d^3 r_d$$

[0050]

[0051] 수학식 5는 광 흡수체(20)의 한 점 $\vec{r}_o$ 에서 발생하는 광음향 신호가 표면 분포 함수 $D(\vec{r}_d)$ 를 갖는 광음향 측정기(200)에 의해 측정되는 값을 나타낸다. 수학식 5에서 k는 초음파의 파수이다(즉, $k = \frac{2\pi\nu}{c_s}$).

[0052] 통상적인 광음향 측정에서는 광음향 측정기(200)로 측정되는 광음향 신호에 대해 주파수 영역에서 정합 필터링 처리가 이루어지며, 이러한 정합 필터링 처리는 처리장치(300)에 의해 이루어질 수 있다. 처리장치(300)에 의해 이루어지는 정합 필터링 처리는, 구체적으로 수학식 4로 측정되는 광음향 스펙트럼 $\bar{G}(\nu)$ 에, 정합 필터링 함수 $\tilde{Q}(\nu)$ 를 곱함으로써 이루어질 수 있다. 처리장치(300)에 의해 정합 필터링 처리가 이루어진 최종적인 광음향 스펙트럼은 다음의 수학식 6과 같다.

[0053] [수학식 6]

$$\tilde{G}(\nu) = \tilde{I}(\nu) \tilde{I}(\nu) \left[\int_{\infty} H(\vec{r}_o) K(\vec{r}_o, \nu) d^3 r_o \right] \tilde{Q}(\nu)$$

[0054]

[0055] 참고로, 기존의 주파수 영역 광음향 측정에서는 정합 필터링을 위해 정합 필터링 함수 $\tilde{Q}(\nu) = \tilde{I}^*(\nu)$ 를 적용해 왔으며, 여기서 $\tilde{I}^*(\nu)$ 은 입사빔의 세기 $I(t)$ 를 주파수 영역에서 푸리에 변환한 $\tilde{I}(\nu)$ (즉, 입사빔 스펙트럼)의 켄쥬게이트값이다.

[0056] 수학식 6에서 대괄호 부분인 $\int_{\infty} H(\vec{r}_o) K(\vec{r}_o, \nu) d^3 r_o$ 은 광음향 측정기(200)의 모양 및 광 흡수체(20)의 모양에 따라 결정되는 공간적 광음향 스펙트럼을 의미하며, 이하에서는 이를 $\tilde{O}(\nu)$ 로 정의하기로 한다. 상기 $\tilde{O}(\nu)$ 는 처리장치(300) 내에 미리 저장되어 있을 수 있다.

[0057] 정합 필터링된 잡음이 없는 이상적인 광음향 스펙트럼을 $\tilde{G}_{PA}(\nu)$ 라 할 때, $\tilde{G}_{PA}(\nu)$ 는 다음의 수학식 7과 같이 나타낼 수 있다.

[0058] [수학식 7]

$$\tilde{G}_{PA}(\nu) = \tilde{I}(\nu) \tilde{I}(\nu) \tilde{O}(\nu) \tilde{Q}(\nu)$$

[0059]

[0060] 한편, 광음향 측정 시에는 광음향 열 잡음과 같은 광음향 잡음이 항상 존재하기 마련이다. 정합 필터링된 광음향 잡음 스펙트럼을 $\tilde{G}_N(\nu)$ 라 할 때, $\tilde{G}_N(\nu)$ 는 다음의 수학식 8과 같이 나타낼 수 있다.

[0061] [수학식 8]

[0062]
$$\tilde{G}_N(\nu) = \tilde{N}(\nu)\tilde{Q}(\nu)$$

[0063] 수학식 8에서 $\tilde{N}(\nu)$ 는 광음향 잡음 스펙트럼이며, $\tilde{Q}(\nu)$ 는 정합 필터링 함수이다. 이하의 시뮬레이션에서는 수학식 8의 광음향 잡음 스펙트럼 $\tilde{N}(\nu) = \sigma_N$ 로 정하였고(즉, 전체 주파수에서 백색 가우시안 잡음으로 정함), 그 값을 0.001로 하였다.

[0064] 광음향 측정기(200)로 측정되는 광음향 신호의 신호 대 잡음비(SNR)는 상기 수학식 7 및 8를 이용하여 다음의 수학식 9와 같이 나타낼 수 있다.

[0065] [수학식 9]

[0066]
$$SNR^2 = \frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{G}_{PA}(\nu) e^{2\pi i \nu t} d\nu \right|^2_{\max}}{\left\langle \left| \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{G}_N(\nu) e^{2\pi i \nu t} d\nu \right|^2 \right\rangle}$$

[0067] 수학식 9에서 분자는 주파수 영역에서 이상적인 광음향 신호의 최대값을 의미하고, 분모는 주파수 영역에서 광음향 잡음의 시간 평균을 나타낸다(즉, 광음향 잡음값의 분산).

[0068] 한편, 수학식 7에서 광음향 측정기(200)의 전달 함수 $\tilde{T}(\nu)$ 의 특성은 광음향 측정기(200)가 압전(piezo) 물질로 광음향을 측정하는 타입인 경우, KLM(KrimholtzLeedom Matthaei) 모델로 잘 묘사된다고 알려져 있다. 이 KLM 모델에 의해 중심 주파수가 3MHz인 광음향 측정기(200)의 전달 함수 $\tilde{T}(\nu)$ 가 도 2에 나타나 있다. 도 2에서 $\text{real}[\tilde{T}(\nu)]$ 은 전달 함수의 실수부, $\text{imag}[\tilde{T}(\nu)]$ 는 전달 함수의 허수부이며, $\text{abs}[\tilde{T}(\nu)]$ 은 전달 함수의 절대값(크기)이다.

[0069] 그리고 초점 거리가 20mm이고, 개구수(NA)가 0.35인 구면 초점을 갖는 광음향 측정기(200)로 반지름이 2mm인 구형 광 흡수체(20)를 측정한 $\tilde{O}(\nu)$ 가 도 3에 나타나 있다. 실제 $\tilde{O}(\nu)$ 는 광음향 측정기(200)의 초점 거리 때문에 빠르게 진동하는 함수이므로, 도 3에서는 $\tilde{O}(\nu)$ 의 크기만을 나타내었다.

[0070] 한편, 광원(100)에서 방출되어 광 확산 매체(10)에 조사되는 입사빔은 다음의 수학식 10과 같은 처프 신호일 수 있다.

[0071] [수학식 10]

[0072]
$$I_{chirp}(t) = \frac{F_{FD}}{T} [1 + \cos(2\pi\nu_c t + \pi b t^2)] \Pi\left(\frac{t}{T}\right)$$

[0073] 수학식 10에서 $I_{chirp}(t)$ 는 처프 신호의 세기, F_{FD} 는 처프 신호의 광 방사 노광량(radiant exposure), ν_c 는 처프 신호의 중심 주파수, b 는 처프 신호의 선형 주파수 증가율, 그리고 $\Pi\left(\frac{t}{T}\right)$ 는 선폭(duration)이 T 인 구형 함수를 나타낸다.

[0074] 도 4a 및 도 4b는 수학식 10에 따른 처프 신호를 개략적으로 나타낸 그래프로서, 보다 구체적으로는 중심 주파수 ν_c 가 3MHz이고, 대역폭 bT 가 4MHz인 처프 신호 $I_{chirp}(t)$ 를 개략적으로 나타낸 그래프이다. 도 4a에서 x축은 시간을, y축은 주파수를 나타내고, 기울기는 처프 신호의 선형 주파수 증가율 b 를 나타낸다. 그리고 도 4b에서 x축은 시간을, y축은 처프 신호의 세기를 나타낸다. 또한, 도 4a 및 도 4b에서 T 는 처프 신호의 선폭을 나타낸다. 이들 도 4a 및 도 4b는 선폭 T 동안 주파수가 점차 증가하고 포락선이 일정한 처프 신호를 개략적으로 도시한 것이다.

[0075] 한편, 광원(100)에서 방출되어 광 확산 매체(10)에 조사되는 입사빔은 다음의 수학식 11과 같은 주기 신호일 수 있다.

[0076] [수학식 11]

$$I_i(t) = \frac{F_{FD}}{T} [1 + \cos(2\pi\nu_i t)] \Pi\left(\frac{t}{T}\right)$$

[0078] 본 발명에서 주기 신호는 고정된 주기를 가지고, 시간에 따라 세기가 연속적으로 변하는 신호를 의미하며, 상기 주기 신호로는 정현파 신호, 구형파 신호, 톱니파 신호 등이 이에 해당될 수 있다. 수학식 11은 주기 신호 중에서도 정현파 신호를 나타낸 것으로서, $I_i(t)$ 는 정현파 신호의 세기, F_{FD} 는 정현파 신호의 광 방사 노광량, ν_i 는 정현파 신호의 주파수, 그리고 $\Pi\left(\frac{t}{T}\right)$ 는 선폭이 T인 구형 함수를 나타낸다.

[0079] 도 5a 및 도 5b는 수학식 11에 따른 정현파 신호를 개략적으로 나타낸 그래프로서, 보다 구체적으로는 주파수 ν_c 가 1MHz인 정현파 신호 $I_i(t)$ 를 나타낸 그래프이다. 도 5a에서 x축은 시간을, y축은 주파수를 나타내고, 도 5b에서 x축은 시간을, y축은 정현파 신호의 세기를 나타낸다. 그리고 도 5a 및 도 5b에서 T는 정현파 신호의 선폭을 나타낸다.

[0080] 나아가, 도 6은 주파수가 1MHz인 정현파 신호(도 6의 'cos'), 구형파 신호(도 6의 'rect') 및 톱니파 신호(도 6의 'sawtooth')를 나타낸 그래프이다. 이하에서는 도 6에 나타낸 바와 같은 주기 신호(예를 들어, 정현파 신호, 구형파 신호 및 톱니파 신호)를 이용하여, 광음향 측정기로 측정되는 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 향상시키는 방법에 대해 제한한다.

[0081] 한편, 수학식 10 및 11에서 광 방사 노광량은 단위 면적당 허용되는 입사빔의 에너지를 나타낸다. 이러한 광 방사 노광량은 미국 국립 표준 협회(ANSI)에서 정한 인체 피부에 대한 최대 허용 노광량(maximum permissible exposure)에 따라 최대값이 정해져 있다. 예를 들어, 400~1400nm의 파장 영역대에서 선폭이 10^{-7} ~ 10초 사이의 입사빔에 대한 최대 허용 노광량 F_{FD} 는 다음의 수학식 12와 같다.

[0082] [수학식 12]

$$F_{FD} = 1.1 \times 10^4 C_A T^{0.25}$$

[0084] 수학식 12에서 최대 허용 노광량 F_{FD} 의 단위는 $[J/m^2]$ 이다. C_A 는 파장에 따라 달라지는 상수인데, 이하의 시뮬레이션에서는 가시광선 파장대인 400~700nm를 가정하여 1로 근사화하였다. 그리고 T는 입사빔(예를 들어, 주기 신호 또는 처프 신호)의 선폭을 나타낸다.

[0085] 먼저, 수학식 10의 처프 신호가 광 확산 매체(10)의 내부에 위치하는 광 흡수체(20)에 흡수될 경우, 광음향 측정기(200)로 측정되는 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 계산하였다. 수학식 10 및 12의 처프 신호에서 중심 주파수 $\nu_c=3\text{MHz}$, 대역폭 $bT=4\text{MHz}$ (즉, 1~5MHz로 처프 신호의 주파수가 선형적으로 증가)로 하여 계산한 신호 대 잡음비($\text{SNR}_{\text{chirp}}$)가 도 7에 나타나 있다.

[0086] 구체적으로, 도 7은 광원(100)을 통해 방출되는 처프 신호의 선폭 T가 0.25~1.5msec일 때, 광음향 측정기(200)로 측정되는 광음향 신호의 신호 대 잡음비($\text{SNR}_{\text{chirp}; 1\sim 5\text{MHz}}$)와, 상기 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 평균한 결과(Ave $\text{SNR}_{\text{chirp}}$)를 나타낸 도면이다. 도 7의 결과는 0.25~1.5msec 중 어느 하나의 선폭에서, 주파수가 1MHz에서 5MHz로 선형적으로 증가하는 단일 개의 처프 신호를 처리장치(300)가 광원(100)을 통해 방출되도록 한 뒤, 광음향 측정기(200)가 측정한 광음향 신호를 상기 수학식 7 및 8을 이용하여 계산하고, 상기 수학식 7 및 8의 계산 결과를 수학식 9에 대입하여 상기 광음향 신호의 신호 대 잡음비($\text{SNR}_{\text{chirp}}$)를 계산한 것이다. 여기서, 처리장치(300)에 의해 이루어지는 상기 수학식 7 및 8의 계산은, 수학식 10에 따른 처프 신호의 세기 $I_{\text{chirp}}(t)$ 를 푸리에 변환하여 입사빔 스펙트럼 $\tilde{I}(\nu)$ 를 계산한 뒤, 수학식 7 및 8에 나타나 있는 정합 필터링 함수 $\tilde{Q}(\nu) = \tilde{I}^*(\nu)$ 로 하여 이루어진 것이다.

[0087] 참고로, 처프 신호의 경우에는 주어진 선폭 T 안에서 처프 신호의 주파수가 연속적으로 변해야 한다. 다만, 광원(100)에서 방출되는 처프 신호의 샘플링 속도(sampling rate)는 한정적이기 때문에, 예를 들어 0.25msec의 선폭에서 1MHz에서 5MHz까지 변하는 처프 신호를 방출하는 광원(100)을 실제로 구현하기는 매우 어렵다. 이에 따

라, 실제 주파수 영역 광음향 측정에서는 처프 신호의 선폴을 통상적으로 1msec 이상으로 한다.

[0088] 도 8a는 선폴 $T=250 \mu \text{sec}$ 일 때 주파수가 1MHz에서 5MHz까지 변하는 처프 신호가 광 흡수체(20)에 흡수될 경우, 광음향 측정기(200)로 측정되는 광음향 신호를 처리장치(300)가 $\tilde{Q}(\nu) = \tilde{I}^*(\nu)$ 로 정합 필터링을 하였을 때 잡음이 포함되지 않은 이상적인 광음향 신호를 나타낸 도면이다. 그리고 도 8b는 선폴 $T=250 \mu \text{sec}$ 일 때 주파수가 1MHz에서 5MHz까지 변하는 처프 신호가 광 흡수체(20)에 흡수될 경우, 광음향 측정기(200)로 측정되는 광음향 신호를 처리장치(300)가 $\tilde{Q}(\nu) = \tilde{I}^*(\nu)$ 로 정합 필터링을 하였을 때 잡음이 포함된 광음향 신호를 나타낸 도면이다.

[0089] 도 8a 및 도 8b에 의하면, 20mm의 초점 거리를 갖는 광음향 측정기(200)로 광음향 신호를 측정했기 때문에, 광음향 신호의 피크 값이 $13.33 \mu \text{sec}(= 20\text{mm} / 1500\text{m/s})$ 일 때 나타난다는 것을 확인할 수 있다.

[0091] 앞에서는 단일 개의 처프 신호를 광 흡수체(20)에 흡수시켜 광음향 측정기(200)로 측정되는 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 계산하였지만, 이번에는 수학적 식 11에 나타난 정현파 신호 다수 개를 광 확산 매체(10)의 내부에 위치하는 광 흡수체(20)에 흡수시킨 뒤 광음향 측정기(200)로 측정되는 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 계산하였다.

[0092] 상기 계산 과정에서는, 먼저 처리장치(300)가 광원(100)을 통해 방출될 정현파 신호의 특정 주파수 구간을 예를 들어 1~5MHz로 설정할 수 있다. 이후 처리장치(300)는 상기 특정 주파수 구간 내에서 N개(여기서, N은 2이상의 자연수)의 주파수를 선택해서, 그 선택된 다수 개의 주파수를 갖는 정현파 신호 각각을 광원(100)을 통해 방출되도록 할 수 있다. 즉, 처리장치(300)는 광원(100)을 통해 방출될 정현파 신호의 주파수를 상이하게 다수 개 선택할 수 있다.

[0093] 광원(100)은 처리장치(300)에 의해 선택된 다수 개의 주파수를 갖는 정현파 신호 각각을 광 확산 매체(10)로 방출하여, 광 확산 매체(10)의 내부에 위치하는 광 흡수체(20)에 흡수시킬 수 있다. 이에 따라, 광 흡수체(20)에서는 정현파 형태의 광음향 신호가 발생하게 되며, 광음향 측정기(200)는 상기 다수 개의 주파수를 갖는 정현파 신호 각각이 광 흡수체(20)에 흡수됨에 따라 발생하는 다수 개의 광음향 신호를 측정할 수 있다. 이후 처리장치(300)는 광음향 측정기(200)에 의해 측정된 다수 개의 광음향 신호를 주파수 영역에서 정합 필터링 처리함으로써, 광 흡수체(20)에서 발생하는 광음향 신호의 최종값을 획득할 수 있다.

[0094] 광음향 측정기(200)에 의해 측정되는 다수 개의 정현파 광음향 신호에 대해 처리장치(300)가 정합 필터링 처리를 하는 방법으로는 결맞음(coherent) 합산 방법과 비결맞음(incoherent) 합산 방법이 있다.

[0095] 우선, 결맞음 합산 방법은 다음의 수학적 식 13 및 14와 같이, 처리장치(300)가 광음향 측정기(200)에 의해 측정되는 다수 개의 광음향 신호(여기서, 각각의 광음향 신호에는 광 흡수체(20)로부터 발생한 잡음이 없는 이상적인 광음향 신호와, 광음향 잡음값이 혼합되어 있음)를 주파수 영역에서 합산하여 광음향 신호 합산값을 산출하고, 이후 상기 광음향 신호 합산값을 상기 광원(100)을 통해 방출되는 다수 개의 주파수를 갖는 정현파 신호를 이용해서 정합 필터링 처리하는 방법이다. 여기서, 상기 정합 필터링 처리는, 아래에서 설명하는 바와 같이, 처리장치(300)가 주파수 영역에서 상기 광원(100)을 통해 방출되는 다수 개의 주파수를 갖는 정현파 신호 각각의 컨쥬게이트값을 합산한 정현파 신호의 컨쥬게이트 합산값에 의해 이루어질 수 있다.

[0096] 다음의 수학적 식 13은 처리장치(300)가 주파수 영역에서, 광음향 측정기(200)에 의해 측정되는 광음향 신호 중 잡음이 없는 이상적인 광음향 신호에 대해 결맞음 합산 방법으로 정합 필터링 처리하는 방법에 관한 것이다.

[0097] [수학적 식 13]

$$G_{coherentPA}(\nu) = [\sum_i^N \tilde{T}(\nu) \tilde{O}(\nu) \tilde{I}_i(\nu)] [\sum_j^N \tilde{Q}_j(\nu)]$$

[0099] 수학적 식 13에서 $G_{coherentPA}(\nu)$ 는 잡음이 없는 이상적인 광음향 신호에 대해 정합 필터링 처리된 값이고, $\sum_i^N \tilde{T}(\nu) \tilde{O}(\nu) \tilde{I}_i(\nu)$ 는 주파수 영역에서 다수 개의 이상적인 광음향 신호를 합산한 이상적인 광음향 신호 합산

값이며, $\sum_i^N \tilde{Q}_j(\nu)$ 는 정합 필터링 함수의 합산값이다.

[0100] 상술한 바와 같이, 주파수 영역 광음향 측정에서는 정합 필터링을 위해 정합 필터링 함수 $\tilde{Q}(\nu) = \tilde{I}^*(\nu)$ 로 하

는 것이 바람직하며, 이에 따라 수학적 식 13에서 정합 필터링 함수 $\sum_i^N \tilde{Q}_j(\nu)$ 는 $\sum_i^N \tilde{I}_j^*(\nu)$ 로 하는 것이 바람직하다. 여기서 $\tilde{I}^*(\nu)$ 는 입사빔의 세기 $I(t)$ 를 주파수 영역에서 푸리에 변환한 $\tilde{I}(\nu)$ (즉, 입사빔 스펙트럼)의 켄쥬게이트값이다. 즉, 처리장치(300)는 주파수 영역에서 다수 개의 주파수를 갖는 정현파 신호 각각의 켄쥬게이트

값을 합산한 정현파 신호 켄쥬게이트 합산값 $\sum_i^N \tilde{I}_j^*(\nu)$ 에 의해, 다수 개의 이상적인 광음향 신호 합산값

$\sum_i^N \tilde{I}(\nu) \tilde{O}(\nu) \tilde{I}_i(\nu)$ 의 정합 필터링 처리를 할 수 있다.

[0101] 그리고 다음의 수학적 식 14는 처리장치(300)가 주파수 영역에서, 광음향 측정기(200)에 의해 측정되는 광음향 신호 중 광음향 잡음값에 대해 결맞음 합산 방법으로 정합 필터링 처리하는 방법에 관한 것이다.

[0102] [수학적 식 14]

$$\tilde{G}_{coherentN}(\nu) = [\sum_i^N \tilde{N}_i(\nu)] [\sum_i^N \tilde{Q}_j(\nu)]$$

[0103]

수학적 식 14에서 $\tilde{G}_{coherentN}(\nu)$ 는 광음향 잡음값에 대해 정합 필터링 처리된 값이고, $\sum_i^N \tilde{N}_i(\nu)$ 는 주파수 영역에

서 다수 개의 정현파 광음향 잡음값을 합산한 광음향 잡음 합산값이며, $\sum_i^N \tilde{Q}_j(\nu)$ 는 정합 필터링 함수의 합산값이다.

[0105] 수학적 식 14에서도 정합 필터링 함수 $\tilde{Q}(\nu) = \tilde{I}^*(\nu)$ 일 수 있으며, 이에 따라 정합 필터링 함수의 합산값

$\sum_i^N \tilde{Q}_j(\nu)$ 는 $\sum_i^N \tilde{I}_j^*(\nu)$ 일 수 있다. 여기서 $\tilde{I}^*(\nu)$ 는 입사빔의 세기 $I(t)$ 를 주파수 영역에서 푸리에 변환한 $\tilde{I}(\nu)$ (즉, 입사빔 스펙트럼)의 켄쥬게이트값이다. 즉, 처리장치(300)는 주파수 영역에서 다수 개의 주파수를 갖

는 정현파 신호 각각의 켄쥬게이트값의 합산값 $\sum_i^N \tilde{I}_j^*(\nu)$ 에 의해, 광음향 잡음 합산값 $\sum_i^N \tilde{N}_i(\nu)$ 의 정합 필터링 처리를 할 수 있다.

[0106] 다음으로, 비결맞음 합산 방법은 다음의 수학적 식 15 및 16과 같이, 처리장치(300)가 주파수 영역에서 다수 개의 광음향 신호 각각을, 상기 각각의 광음향 신호를 발생시키는데 기인한 정현파 신호를 이용해서 정합 필터링 처리를 하여 유닛 광음향 스펙트럼 다수 개를 산출하고, 상기 산출한 유닛 광음향 스펙트럼 다수 개를 합산하는 방법이다. 여기서, 상기 각각의 광음향 신호의 정합 필터링 처리는, 상기 각각의 광음향 신호를 발생시키는데 기인한 정현파 신호의 켄쥬게이트값에 의해 이루어질 수 있다.

[0107] 다음의 수학적 식 15는 처리장치(300)가 주파수 영역에서, 광음향 측정기(200)에 의해 측정되는 광음향 신호 중 잡음이 없는 이상적인 광음향 신호에 대해 비결맞음 합산 방법으로 정합 필터링 처리하는 방법에 관한 것이다.

[0108] [수학적 식 15]

$$\tilde{G}_{incoherentPA}(\nu) = \sum_i^N \tilde{I}(\nu) \tilde{O}(\nu) \tilde{I}_i(\nu) \tilde{Q}_i(\nu)$$

[0109]

수학적 식 15에서 $\tilde{G}_{incoherentPA}(\nu)$ 는 잡음이 없는 이상적인 광음향 신호에 대해 정합 필터링 처리된 값이고, $\tilde{I}(\nu) \tilde{O}(\nu) \tilde{I}_i(\nu)$ 는 각각의 주파수를 갖는 정현파 신호로 인해 광음향 측정기(200)로 측정되는 이상적인 광음향

신호이며, $\tilde{Q}_i(\nu)$ 는 상기 이상적인 광음향 신호를 정합 필터링하기 위한 정합 필터링 함수이다.

[0111] 그리고 수학적 식 15에서 $\tilde{T}(\nu)\tilde{O}(\nu)\tilde{I}_i(\nu)\tilde{Q}_i(\nu)$ 는 광음향 측정기(200)로 측정되는 이상적인 광음향 신호를 정합 필터링 함수 $\tilde{Q}_i(\nu)$ 로 정합 필터링 처리를 한 유닛 광음향 스펙트럼이고, $\sum_i^N \tilde{T}(\nu)\tilde{O}(\nu)\tilde{I}_i(\nu)\tilde{Q}_i(\nu)$ 는 상기 유닛 광음향 스펙트럼 다수 개(즉, N개)를 합산한 값이다.

[0112] 상술한 바와 같이, 주파수 영역 광음향 측정에서는 정합 필터링을 위해 정합 필터링 함수 $\tilde{Q}(\nu) = \tilde{I}^*(\nu)$ 로 하는 것이 바람직하며, 여기서 $\tilde{I}^*(\nu)$ 는 입사빔의 세기 I(t)를 주파수 영역에서 푸리에 변환한 $\tilde{I}(\nu)$ (즉, 입사빔 스펙트럼)의 켄쥬게이트값이다.

[0113] 즉, 처리장치(300)는 주파수 영역에서, 각각의 이상적인 광음향 신호를 발생시키는데 기인한 정현파 신호의 켄쥬게이트값에 의해 각각의 이상적인 광음향 신호의 정합 필터링 처리를 하여 이상적인 유닛 광음향 스펙트럼 $\tilde{T}(\nu)\tilde{O}(\nu)\tilde{I}_i(\nu)\tilde{I}_i^*(\nu)$ 다수 개를 산출할 수 있으며, 이후 상기 이상적인 유닛 광음향 스펙트럼 $\tilde{T}(\nu)\tilde{O}(\nu)\tilde{I}_i(\nu)\tilde{I}_i^*(\nu)$ 다수 개를 합산하여 최종적인 광음향 신호를 획득할 수 있다.

[0114] 다음의 수학적 식 16은 처리장치(300)가 주파수 영역에서, 광음향 측정기(200)에 의해 측정되는 광음향 신호 중 광음향 잡음값에 대해 비결맞음 합산 방법으로 정합 필터링 처리를 하는 방법에 관한 것이다.

[0115] [수학적 식 16]

$$\tilde{G}_{incoherentN}(\nu) = \sum_i^N \tilde{N}_i(\nu)\tilde{Q}_i(\nu)$$

[0117] 수학적 식 16에서 $\tilde{G}_{incoherentN}(\nu)$ 는 광음향 잡음값에 대해 정합 필터링 처리된 값이고, $\tilde{N}_i(\nu)$ 는 광음향 측정기(200)로 측정되는 광음향 잡음값이며, $\tilde{Q}_i(\nu)$ 는 정합 필터링 함수이다.

[0118] 수학적 식 16에서도 정합 필터링 함수 $\tilde{Q}(\nu) = \tilde{I}^*(\nu)$ 일 수 있으며, 여기서 $\tilde{I}^*(\nu)$ 는 입사빔의 세기 I(t)를 주파수 영역에서 푸리에 변환한 $\tilde{I}(\nu)$ (즉, 입사빔 스펙트럼)의 켄쥬게이트값이다.

[0119] 즉, 처리장치(300)는 주파수 영역에서 각각의 광음향 잡음값을 발생시키는데 기인한 정현파 신호의 켄쥬게이트값에 의해, 각각의 광음향 잡음값에 정합 필터링 처리를 하여 유닛 광음향 잡음 스펙트럼 $\tilde{N}_i(\nu)\tilde{Q}_i(\nu)$ 다수 개를 산출할 수 있으며, 이후 상기 유닛 광음향 잡음 스펙트럼 $\tilde{N}_i(\nu)\tilde{Q}_i(\nu)$ 다수 개를 합산하여 광음향 잡음값을 획득할 수 있다.

[0121] 도 9는 본 발명의 제1 실시예에 따른 주파수 영역 광음향 측정에서 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 향상시키는 방법의 흐름도이다.

[0122] 처리장치(300)는 광원(100)을 통해 방출될 정현파 신호의 주파수 구간을, 앞서 도 7에 나타난 처프 신호의 주파수 구간과 마찬가지로 1~5MHz로 설정할 수 있다. 이후 처리장치(300)는 상기 1~5MHz의 주파수 구간 내에서 광원(100)을 통해 방출될 N(여기서, N은 2이상의 자연수임)개의 주파수를 상이하게 선택할 수 있다(S110). 이 경우 광원(100)에서는 상기 처리장치(300)에 의해 선택된 다수 개의 주파수를 갖는 정현파 신호 각각을 광 확산 매체(10)로 순차적으로 방출하여, 상기 광 확산 매체(10)의 내부에 위치하는 광 흡수체(20)에 흡수시킬 수 있다(S120). 예를 들어, 처리장치(300)는 N=51개(주파수 간 간격 $\Delta \nu = 0.08\text{MHz}$) 또는 N=71개($\Delta \nu = 0.057\text{MHz}$)의 주파수를 선택해서, 각 주파수에 해당하는 정현파 신호 다수 개가 광원(100)을 통해 순차적으로 방출되도록 할 수 있다.

[0123] 광원(100)이 상기 처리장치(300)에 의해 선택된 다수 개의 주파수를 갖는 정현파 신호 각각을 광 확산 매체(10)로 방출할 경우, 상기 광 확산 매체(10)의 내부에 위치하는 광 흡수체(20)에서는 정현파 형태의 광음향 신호가 발생하게 된다. 이때 광음향 측정기(200)는 상기 다수 개의 주파수를 갖는 정현파 신호 각각이 상기 광 흡수

체(20)에 흡수됨에 따라 발생하는 다수 개의 광음향 신호를 측정한다(S130). 이후 처리장치(300)는 상기 광음향 측정기(200)에 의해 측정된 다수 개의 광음향 신호를 주파수 영역에서 처리함으로써(S140), 주파수 영역 광음향 측정에서 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 향상시킬 수 있다.

[0124] 구체적으로, 처리장치(300)는 상기 수학식 13 및 14를 통해 설명한 바와 같이(즉, 결맞음 합산 방법), 주파수 영역에서 다수 개의 광음향 신호를 합산하여 광음향 신호 합산값을 산출하고(S141), 이후 상기 광음향 신호 합산값을, 상기 다수 개의 주파수를 갖는 정현파 신호를 이용해서 정합 필터링 처리할 수 있다(S142). 여기서, 처리장치(300)는 주파수 영역에서 상기 다수 개의 주파수를 갖는 정현파 신호 각각의 컨쥬게이트값을 합산한 정현파 신호의 컨쥬게이트 합산값에 의해, 상기 광음향 신호 합산값의 정합 필터링 처리를 할 수 있다.

[0125] 또는, 처리장치(300)는 상기 수학식 15 및 16을 통해 설명한 바와 같이(즉, 비결맞음 합산 방법), 주파수 영역에서 다수 개의 광음향 신호 각각을, 상기 각각의 광음향 신호를 발생시키는데 기인한 정현파 신호를 이용해서 정합 필터링 처리를 하여 유닛 광음향 스펙트럼 다수 개를 산출할 수 있다(S143). 여기서, 처리장치(300)는 주파수 영역에서 상기 각각의 광음향 신호를 발생시키는데 기인한 정현파 신호의 컨쥬게이트값에 의해 상기 각각의 광음향 신호의 정합 필터링 처리를 하여, 상기 유닛 광음향 스펙트럼 다수 개를 산출할 수 있다. 이후, 처리장치(300)는 상기 유닛 광음향 스펙트럼 다수 개를 합산할 수 있다(S144).

[0126] 도 10은 다수 개의 상이한 주파수를 갖는 정현파 신호를 광 흡수체에 흡수시킨 뒤, 결맞음 합산 방법으로 획득한 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 나타낸 도면이다. 구체적으로, 도 10은 처리장치(300)가 1~5MHz의 주파수 구간 내에서 $N=51$ 개(주파수 간 간격 $\Delta v=0.08\text{MHz}$)의 주파수($51 \cos f_{cns}$) 또는 $N=71$ 개($\Delta v=0.057\text{MHz}$)의 주파수($71 \cos f_{cns}$)를 선택해서, 각 주파수에 해당하는 정현파 신호 다수 개가 광원(100)을 통해 순차적으로 방출되도록 한 뒤, 광음향 측정기(200)가 측정한 다수 개의 광음향 신호를 상기 수학식 13 및 14로 계산하고, 상기 수학식 13 및 14의 계산 결과를 수학식 9에 대입하여 상기 광음향 신호의 신호 대 잡음비($\text{SNR}_{\text{coherent}}$)를 계산한 것이다.

[0127] 그리고 도 11은 다수 개의 상이한 주파수를 갖는 정현파 신호를 광 흡수체에 흡수시킨 뒤, 비결맞음 합산 방법으로 획득한 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 나타낸 도면이다. 구체적으로, 도 11은 처리장치(300)가 1~5MHz의 주파수 구간 내에서 $N=51$ 개(주파수 간 간격 $\Delta v=0.08\text{MHz}$)의 주파수($51 \cos f_{cns}$) 또는 $N=71$ 개($\Delta v=0.057\text{MHz}$)의 주파수($71 \cos f_{cns}$)를 선택해서, 각 주파수에 해당하는 정현파 신호 다수 개가 광원(100)을 통해 순차적으로 방출되도록 한 뒤, 광음향 측정기(200)가 측정한 다수 개의 광음향 신호를 상기 수학식 15 및 16으로 계산하고, 상기 수학식 15 및 16의 계산 결과를 수학식 9에 대입하여 상기 광음향 신호의 신호 대 잡음비($\text{SNR}_{\text{incoherent}}$)를 계산한 것이다.

[0128] 정현파 신호는 처프 신호와 달리 시간에 따라 주파수의 변동이 없으므로, 정현파 신호의 선폭을 처프 신호의 선폭에 비해 매우 짧게 설정할 수 있다. 이에 따라, 도 10 및 도 11의 경우에는 정현파 신호의 선폭 T 를 0.02~0.5msec로 정하였다.

[0129] 도 10에서 알 수 있듯이, 다수 개(예를 들어, 51개 또는 71개)의 상이한 주파수를 갖는 정현파 신호를 광 흡수체(20)에 흡수시킨 뒤 결맞음 합산 방법으로 획득한 광음향 신호의 신호 대 잡음비($\text{SNR}_{\text{coherent}}$)는, 도 7에 나타난 단일 개의 처프 신호를 광 흡수체(20)에 흡수시킨 뒤 획득한 광음향 신호의 신호 대 잡음비($\text{SNR}_{\text{chirp}}$)에 비해 크다는 것을 알 수 있다.

[0130] 또한, 도 11에서 알 수 있듯이, 다수 개(예를 들어, 51개 또는 71개)의 상이한 주파수를 갖는 정현파 신호를 광 흡수체(20)에 흡수시킨 뒤 비결맞음 합산 방법으로 계산한 광음향 신호의 신호 대 잡음비($\text{SNR}_{\text{incoherent}}$)는, 도 7에 나타난 단일 개의 처프 신호를 광 흡수체(20)에 흡수시킨 뒤 계산한 광음향 신호의 신호 대 잡음비($\text{SNR}_{\text{chirp}}$), 그리고 도 9에 나타난 광음향 신호의 신호 대 잡음비($\text{SNR}_{\text{coherent}}$)에 비해 매우 크다는 것을 알 수 있다.

[0131] 한편, 선폭 $T=20 \mu\text{sec}$ 이고, 1~5MHz의 주파수 구간 내에서 총 71개($\Delta v=0.057\text{MHz}$)의 상이한 주파수를 갖는 정현파 신호를 광 흡수체(20)에 흡수시킨 뒤 결맞음 합산 방법으로 계산된, 잡음이 없는 이상적인 광음향 신호($\text{PA}_{\text{coherent}} \text{ signal}$)와 잡음이 포함된 광음향 신호($\text{Noisy PA}_{\text{coherent}} \text{ signal}$)를 도 12a와 도 12b에 각각 나타냈다. 도 12a에서 13.33 μsec 의 위치에 있는 값은 이상적인 광음향 신호의 피크 값이고, 그 우측에서 상기 이상적인 광음향 신호의 피크 값보다 작은 피크를 갖는 값은 각각의 광음향 신호와 정합 필터링 함수 간의 연관(correlation) 과정에서 발생한 것이다. 도 12a 및 도 12b에 의하면, 20mm의 초점 거리를 갖는 광음향 측정기(200)로 광음향

신호를 측정했기 때문에, 광음향 신호의 피크 값이 $13.33 \mu\text{sec} (= 20\text{mm} / 1500\text{m/s})$ 일 때 나타난다는 것을 확인할 수 있다.

[0132] 또한, 선폭 $T=20 \mu\text{sec}$ 이고, 1~5MHz의 주파수 구간 내에서 총 71개($\Delta v=0.057\text{MHz}$)의 상이한 주파수를 갖는 정현파 신호를 광 흡수체(20)에 흡수시킨 뒤 비결맞음 합산 방법으로 계산된, 잡음이 없는 이상적인 광음향 신호($PA_{\text{incoherent}}$ signal)와 잡음이 포함된 광음향 신호(Noisy $PA_{\text{incoherent}}$ signal)를 도 13a와 도 13b에 각각 나타냈다. 도 13a에서 $13.33 \mu\text{sec}$ 의 위치에 있는 값은 이상적인 광음향 신호의 피크 값이고, 그 우측에서 상기 이상적인 광음향 신호의 피크 값보다 작은 피크를 갖는 값은 각각의 광음향 신호와 정합 필터링 함수 간의 연관 과정에서 발생한 것이다. 도 13a 및 도 13b에 의하면, 20mm의 초점 거리를 갖는 광음향 측정기(200)로 광음향 신호를 측정했기 때문에, 광음향 신호의 피크 값이 $13.33 \mu\text{sec} (= 20\text{mm} / 1500\text{m/s})$ 일 때 나타난다는 것을 확인할 수 있다.

[0133] 이와 같이 다수 개의 정현파 신호를 광 흡수체(20)에 흡수시킬 수도 있지만, 다수 개의 정현파 신호 대신 다수 개의 구형파 신호나 다수 개의 톱니파 신호와 같이 다른 형태의 주기 신호를 광 흡수체(20)에 흡수시킨 뒤, 처리장치가 광음향 측정기에 의해 측정되는 다수 개의 광음향 신호를 주파수 영역에서 처리함으로써, 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 향상시킬 수도 있다.

[0134] 구체적으로, 처리장치(300)는 광원(100)을 통해 방출될 구형파 신호(또는, 톱니파 신호)의 주파수 구간을, 앞서 도 7에 나타난 처프 신호의 주파수 구간과 마찬가지로 1~5MHz로 설정할 수 있다. 이후 처리장치(300)는 상기 1~5MHz의 주파수 구간 내에서 광원(100)을 통해 방출될 N(여기서, N은 2이상의 자연수임)개의 주파수를 상이하게 선택할 수 있다. 이 경우 광원(100)에서는 상기 처리장치(300)에 의해 선택된 다수 개의 주파수를 갖는 구형파 신호(또는, 톱니파 신호) 각각을 광 확산 매체(10)로 순차적으로 방출하여, 상기 광 확산 매체(10)의 내부에 위치하는 광 흡수체(20)에 흡수시킬 수 있다. 예를 들어, 처리장치(300)는 $N=51$ 개(주파수 간 간격 $\Delta v=0.08\text{MHz}$) 또는 $N=71$ 개($\Delta v=0.057\text{MHz}$)의 주파수를 선택해서, 각 주파수에 해당하는 구형파 신호(또는, 톱니파 신호) 다수 개가 광원(100)을 통해 순차적으로 방출되도록 할 수 있다.

[0135] 광원(100)이 상기 처리장치(300)에 의해 선택된 다수 개의 주파수를 갖는 구형파 신호(또는, 톱니파 신호) 각각을 광 확산 매체(10)로 방출할 경우, 상기 광 확산 매체(10)의 내부에 위치하는 광 흡수체(20)에서는 구형파 형태(또는, 톱니파 형태)의 광음향 신호가 발생하게 된다. 이때 광음향 측정기(200)는 상기 다수 개의 주파수를 갖는 구형파 신호(또는, 톱니파 신호) 각각이 상기 광 흡수체(20)에 흡수됨에 따라 발생하는 다수 개의 광음향 신호를 측정한다. 이후 처리장치(300)는 상기 광음향 측정기(200)에 의해 측정된 다수 개의 광음향 신호를 주파수 영역에서 처리함으로써, 주파수 영역 광음향 측정에서 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 향상시킬 수 있다.

[0136] 구체적으로, 처리장치(300)는 상기 수학식 13 및 14를 통해 설명한 바와 동일한 방식으로(즉, 결맞음 합산 방법), 주파수 영역에서 다수 개의 광음향 신호를 합산하여 광음향 신호 합산값을 산출하고, 이후 상기 광음향 신호 합산값을, 상기 다수 개의 주파수를 갖는 구형파 신호(또는, 톱니파 신호)를 이용해서 정합 필터링 처리할 수 있다. 여기서, 처리장치(300)는 주파수 영역에서 상기 다수 개의 주파수를 갖는 구형파 신호(또는, 톱니파 신호) 각각의 컨จู게이트값을 합산한 구형파 신호(또는, 톱니파 신호)의 컨จู게이트 합산값에 의해, 상기 광음향 신호 합산값의 정합 필터링 처리를 할 수 있다.

[0137] 또는, 처리장치(300)는 상기 수학식 15 및 16을 통해 설명한 바와 동일한 방식으로(즉, 비결맞음 합산 방법), 주파수 영역에서 다수 개의 광음향 신호 각각을, 상기 각각의 광음향 신호를 발생시키는데 기인한 구형파 신호(또는, 톱니파 신호)를 이용해서 정합 필터링 처리를 하여 유닛 광음향 스펙트럼 다수 개를 산출할 수 있다. 여기서, 처리장치(300)는 주파수 영역에서 상기 각각의 광음향 신호를 발생시키는데 기인한 구형파 신호(또는, 톱니파 신호)의 컨จู게이트값에 의해 상기 각각의 광음향 신호의 정합 필터링 처리를 하여, 상기 유닛 광음향 스펙트럼 다수 개를 산출할 수 있다. 이후, 처리장치(300)는 상기 유닛 광음향 스펙트럼 다수 개를 합산할 수 있다.

[0138] 도 14는 다수 개의 상이한 주파수를 갖는 구형파 신호를 광 흡수체에 흡수시킨 뒤, 결맞음 합산 방법으로 획득한 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 나타낸 도면이다. 구체적으로, 도 14는 처리장치(300)가 1~5MHz의 주파수 구간 내에서 $N=51$ 개(주파수 간 간격 $\Delta v=0.08\text{MHz}$)의 주파수(51 rect fcns) 또는 $N=71$ 개($\Delta v=0.057\text{MHz}$)의 주파수(71 rect fcns)를 선택해서, 각 주파수에 해당하는 구형파 신호 다수 개가 광원(100)을 통해 순차적으로 방출되도록 한 뒤, 광음향 측정기(200)가 측정한 다수 개의 광음향 신호를 상기 수학식 13 및 14로 계산하고, 상기 수학식 13 및 14의 계산 결과를 수학식 9에 대입하여 상기 광음향 신호의 신호 대 잡음비(SNR_{coherent})를 계산한 것이다.

- [0139] 그리고 도 15는 다수 개의 상이한 주파수를 갖는 구형파 신호를 광 흡수체에 흡수시킨 뒤, 비결맞음 합산 방법으로 획득한 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 나타낸 도면이다. 구체적으로, 도 15는 처리장치(300)가 1~5MHz의 주파수 구간 내에서 $N=51$ 개(주파수 간 간격 $\Delta v=0.08\text{MHz}$)의 주파수(51 rect fcns) 또는 $N=71$ 개($\Delta v=0.057\text{MHz}$)의 주파수(71 rect fcns)를 선택해서, 각 주파수에 해당하는 구형파 신호 다수 개가 광원(100)을 통해 순차적으로 방출되도록 한 뒤, 광음향 측정기(200)가 측정한 다수 개의 광음향 신호를 상기 수학식 15 및 16으로 계산하고, 상기 수학식 15 및 16의 계산 결과를 수학식 9에 대입하여 상기 광음향 신호의 신호 대 잡음비($\text{SNR}_{\text{incoherent}}$)를 계산한 것이다.
- [0140] 구형파 신호는 처프 신호와 달리 시간에 따라 주파수의 변동이 없으므로, 구형파 신호의 선폭을 처프 신호의 선폭에 비해 매우 짧게 설정할 수 있다. 이에 따라, 도 14 및 도 15의 경우에 구형파 신호의 선폭 T를 0.02~0.5msec로 정하였다.
- [0141] 도 14에서 알 수 있듯이, 다수 개(예를 들어, 51개 또는 71개)의 상이한 주파수를 갖는 구형파 신호를 광 흡수체(20)에 흡수시킨 뒤 결맞음 합산 방법으로 획득한 광음향 신호의 신호 대 잡음비($\text{SNR}_{\text{coherent}}$)는, 도 7에 나타낸 단일 개의 처프 신호를 광 흡수체(20)에 흡수시킨 뒤 획득한 광음향 신호의 신호 대 잡음비($\text{SNR}_{\text{chirp}}$)에 비해 크다는 것을 알 수 있다.
- [0142] 또한, 도 15에서 알 수 있듯이, 다수 개(예를 들어, 51개 또는 71개)의 상이한 주파수를 갖는 구형파 신호를 광 흡수체(20)에 흡수시킨 뒤 비결맞음 합산 방법으로 획득한 광음향 신호의 신호 대 잡음비($\text{SNR}_{\text{incoherent}}$)는, 도 7에 나타낸 단일 개의 처프 신호를 광 흡수체(20)에 흡수시킨 뒤 획득한 광음향 신호의 신호 대 잡음비($\text{SNR}_{\text{chirp}}$), 그리고 도 14에 나타낸 광음향 신호의 신호 대 잡음비($\text{SNR}_{\text{coherent}}$)에 비해 매우 크다는 것을 알 수 있다.
- [0143] 도 16은 다수 개의 상이한 주파수를 갖는 톱니파 신호를 광 흡수체에 흡수시킨 뒤, 결맞음 합산 방법으로 획득한 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 나타낸 도면이다. 구체적으로, 도 16은 처리장치(300)가 1~5MHz의 주파수 구간 내에서 $N=51$ 개(주파수 간 간격 $\Delta v=0.08\text{MHz}$)의 주파수(51 sawtooth fcns) 또는 $N=71$ 개($\Delta v=0.057\text{MHz}$)의 주파수(71 sawtooth fcns)를 선택해서, 각 주파수에 해당하는 톱니파 신호 다수 개가 광원(100)을 통해 순차적으로 방출되도록 한 뒤, 광음향 측정기(200)가 측정한 다수 개의 광음향 신호를 상기 수학식 13 및 14로 계산하고, 상기 수학식 13 및 14의 계산 결과를 수학식 9에 대입하여 상기 광음향 신호의 신호 대 잡음비($\text{SNR}_{\text{coherent}}$)를 계산한 것이다.
- [0144] 그리고 도 17은 다수 개의 상이한 주파수를 갖는 톱니파 신호를 광 흡수체에 흡수시킨 뒤, 비결맞음 합산 방법으로 획득한 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 나타낸 도면이다. 구체적으로, 도 17은 처리장치(300)가 1~5MHz의 주파수 구간 내에서 $N=51$ 개(주파수 간 간격 $\Delta v=0.08\text{MHz}$)의 주파수(51 sawtooth fcns) 또는 $N=71$ 개($\Delta v=0.057\text{MHz}$)의 주파수(71 sawtooth fcns)를 선택해서, 각 주파수에 해당하는 톱니파 신호 다수 개가 광원(100)을 통해 순차적으로 방출되도록 한 뒤, 광음향 측정기(200)가 측정한 다수 개의 광음향 신호를 상기 수학식 15 및 16으로 계산하고, 상기 수학식 15 및 16의 계산 결과를 수학식 9에 대입하여 상기 광음향 신호의 신호 대 잡음비($\text{SNR}_{\text{incoherent}}$)를 계산한 것이다.
- [0145] 톱니파 신호는 처프 신호와 달리 시간에 따라 주파수의 변동이 없으므로, 톱니파 신호의 선폭을 처프 신호의 선폭에 비해 매우 짧게 설정할 수 있다. 이에 따라, 도 16 및 도 17의 경우에 톱니파 신호의 선폭 T를 0.02~0.5msec로 정하였다.
- [0146] 도 16에서 알 수 있듯이, 다수 개(예를 들어, 51개 또는 71개)의 상이한 주파수를 갖는 톱니파 신호를 광 흡수체(20)에 흡수시킨 뒤 결맞음 합산 방법으로 획득한 광음향 신호의 신호 대 잡음비($\text{SNR}_{\text{coherent}}$)는, 도 7에 나타낸 단일 개의 처프 신호를 광 흡수체(20)에 흡수시킨 뒤 획득한 광음향 신호의 신호 대 잡음비($\text{SNR}_{\text{chirp}}$)에 비해 크다는 것을 알 수 있다.
- [0147] 또한, 도 17에서 알 수 있듯이, 다수 개(예를 들어, 51개 또는 71개)의 상이한 주파수를 갖는 톱니파 신호를 광 흡수체(20)에 흡수시킨 뒤 비결맞음 합산 방법으로 획득한 광음향 신호의 신호 대 잡음비($\text{SNR}_{\text{incoherent}}$)는, 도 7에 나타낸 단일 개의 처프 신호를 광 흡수체(20)에 흡수시킨 뒤 획득한 광음향 신호의 신호 대 잡음비($\text{SNR}_{\text{chirp}}$), 그리고 도 16에 나타낸 광음향 신호의 신호 대 잡음비($\text{SNR}_{\text{coherent}}$)에 비해 매우 크다는 것을 알 수 있다.

- [0148] 앞에서는 처리장치(300)가 광원(100)을 통해 방출될 주기 신호(즉, 정현파 신호, 구형파 신호 또는 톱니파 신호)의 주파수 구간을 1~5MHz로 설정하였고, 그 주파수 구간 내에서 N=51개 또는 N=71개의 주파수를 동일한 간격으로 선택하였다. 하지만 처리장치(300)는 광원(100)을 통해 방출될 상기 주기 신호의 주파수 구간을 1~5MHz 이외의 구간으로 설정할 수 있고, 주파수의 개수도 얼마든지 다양하게 선택할 수 있으며, 다수 개의 주파수를 반드시 동일한 간격으로 선택할 필요가 없고, 선택되는 다수 개 주파수의 위상 역시 반드시 동일하게 할 필요도 없다.
- [0149] 즉, 처리장치(300)가 주파수 구간, 주파수의 선택 개수, 다수 개의 주파수 간 간격 또는 다수 개 주파수의 위상을 앞서 설명한 예와 달리하더라도, 주기 신호(예를 들어, 정현파 신호, 구형파 신호 또는 톱니파 신호 등) 다수 개를 광 흡수체(20)에 흡수시킨 뒤, 광음향 측정기(200)로 측정되는 광음향 신호를 처리장치(300)가 결맞음 합산 방법 또는 비결맞음 합산 방법으로 처리할 경우에는, 단일 개의 처프 신호를 광 흡수체(20)에 흡수시키는 경우(도 7 참고)에 비해, 광음향 측정기(200)로 측정되는 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 향상시킬 수 있음이 확인되었다.
- [0151] 도 18은 본 발명의 제2 실시예에 따른 주파수 영역 광음향 측정에서 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 향상시키는 방법의 흐름도이다. 본 발명의 제1 실시예에서는 다수 개의 주기 신호를 광 흡수체(20)에 흡수시켰으나, 본 발명의 제2 실시예에서는 다수 개의 처프 신호를 광 흡수체(20)에 흡수시키는 점에서 차이가 있다.
- [0152] 처리장치(300)는 우선 광원(100)을 통해 방출될 처프 신호의 주파수 범위를 상이하게 다수 개 선택할 수 있다(S210). 예를 들어, 처리장치(300)는 광원(100)을 통해 방출될 각 처프 신호의 주파수 범위를 1~5MHz 내에서 M개로 나눈 것으로 선택할 수 있다. 만일 M이 8인 경우, 처리장치(300)는 광원(100)을 통해 방출될 각 처프 신호의 주파수 범위를 1~1.5MHz, 1.5~2MHz, 2~2.5MHz, 2.5~3MHz, 3~3.5MHz, 3.5~4MHz, 4~4.5MHz, 4.5~5MHz와 같이 선택할 수 있다. 만일 M이 16인 경우, 처리장치(300)는 광원(100)을 통해 방출될 각 처프 신호의 주파수 범위를 1~1.25MHz, 1.25~1.5MHz, 1.5~1.75MHz, 1.75~2MHz, 2~2.25MHz, 2.25~2.5MHz, 2.5~2.75MHz, 2.75~3MHz, 3~3.25MHz, 3.25~3.5MHz, 3.5~3.75MHz, 3.75~4MHz, 4~4.25MHz, 4.25~4.5MHz, 4.5~4.75MHz, 4.75~5MHz와 같이 선택할 수 있다.
- [0153] 이 경우 광원(100)에서는 상기 처리장치(300)에 의해 선택된 다수 개의 주파수 범위를 갖는 처프 신호 각각을 광 확산 매체(10)로 순차적으로 방출하여, 상기 광 확산 매체(10)의 내부에 위치하는 광 흡수체(20)에 흡수시킬 수 있다(S220).
- [0154] 광원(100)이 상기 처리장치(300)에 의해 선택된 다수 개의 주파수 범위를 갖는 처프 신호 각각을 광 확산 매체(10)로 방출할 경우, 상기 광 확산 매체(10)의 내부에 위치하는 광 흡수체(20)에서는 처프 형태의 광음향 신호가 발생하게 된다. 이때 광음향 측정기(200)는 상기 다수 개의 주파수 범위를 갖는 처프 신호 각각이 상기 광 흡수체(20)에 흡수됨에 따라 발생하는 다수 개의 광음향 신호를 측정한다(S230). 이후 처리장치(300)는 상기 광음향 측정기(200)에 의해 측정된 다수 개의 광음향 신호를 주파수 영역에서 처리함으로써(S240), 주파수 영역 광음향 측정에서 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 향상시킬 수 있다.
- [0155] 상술한 바와 같이, 광음향 측정기(200)에 의해 측정되는 다수 개의 광음향 신호에 대해 처리장치(300)가 정합 필터링 처리를 하는 방법으로는 결맞음 합산 방법과 비결맞음 합산 방법이 있다.
- [0156] 구체적으로, 처리장치(300)는 상기 수학적 식 13 및 14를 통해 설명한 바와 동일한 방식으로(즉, 결맞음 합산 방법), 주파수 영역에서 다수 개의 광음향 신호를 합산하여 광음향 신호 합산값을 산출하고(S241), 이후 상기 광음향 신호 합산값을, 상기 다수 개의 주파수 범위를 갖는 처프 신호를 이용해서 정합 필터링 처리할 수 있다(S242). 여기서, 처리장치(300)는 주파수 영역에서 상기 다수 개의 주파수 범위를 갖는 처프 신호 각각의 컨주게이트값을 합산한 처프 신호의 컨주게이트 합산값에 의해, 상기 광음향 신호 합산값의 정합 필터링 처리를 할 수 있다.
- [0157] 또는, 처리장치(300)는 상기 수학적 식 15 및 16을 통해 설명한 바와 동일한 방식으로(비결맞음 합산 방법), 주파수 영역에서 다수 개의 광음향 신호 각각을, 상기 각각의 광음향 신호를 발생시키는데 기인한 처프 신호를 이용해서 정합 필터링 처리를 하여 유닛 광음향 스펙트럼 다수 개를 산출할 수 있다(S243). 여기서, 처리장치(300)는 주파수 영역에서 상기 각각의 광음향 신호를 발생시키는데 기인한 처프 신호의 컨주게이트값에 의해 상기 각각의 광음향 신호의 정합 필터링 처리를 하여, 상기 유닛 광음향 스펙트럼 다수 개를 산출할 수 있다. 이후, 처

리장치(300)는 상기 유닛 광음향 스펙트럼 다수 개를 합산할 수 있다(S244).

[0158] 도 19는 다수 개의 상이한 주파수 범위를 갖는 처프 신호를 광 흡수체에 흡수시킨 뒤, 결맞음 합산 방법으로 획득한 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 나타낸 도면이다. 구체적으로, 도 19는 처리장치(300)가 1~5MHz의 주파수 구간 내에서 M=8개의 주파수 범위(8 chirp signals) 또는 M=16개의 주파수 범위(16 chirp signals)를 선택해서, 각 주파수 범위에 해당하는 처프 신호 다수 개가 광원(100)을 통해 순차적으로 방출되도록 한 뒤, 광음향 측정기(200)가 측정된 다수 개의 광음향 신호를 상기 수학식 13 및 14로 계산하고, 상기 수학식 13 및 14의 계산 결과를 수학식 9에 대입하여 상기 광음향 신호의 신호 대 잡음비(coherent SNR_{chirp})를 계산한 것이다.

[0159] 그리고 도 20은 다수 개의 상이한 주파수 범위를 갖는 처프 신호를 광 흡수체에 흡수시킨 뒤, 비결맞음 합산 방법으로 획득한 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 나타낸 도면이다. 구체적으로, 도 20은 처리장치(300)가 1~5MHz의 주파수 구간 내에서 M=8개의 주파수 범위(8 Chirp signals) 또는 M=16개의 주파수 범위(16 Chirp signals)를 선택해서, 각 주파수 범위에 해당하는 처프 신호 다수 개가 광원(100)을 통해 순차적으로 방출되도록 한 뒤, 광음향 측정기(200)가 측정된 다수 개의 광음향 신호를 상기 수학식 15 및 16으로 계산하고, 상기 수학식 15 및 16의 계산 결과를 수학식 9에 대입하여 상기 광음향 신호의 신호 대 잡음비(incoherent SNR_{chirp})를 계산한 것이다.

[0160] 도 19에서 알 수 있듯이, 다수 개(예를 들어, 8개 또는 16개)의 상이한 주파수 범위를 갖는 처프 신호를 광 흡수체(20)에 흡수시킨 뒤 결맞음 합산 방법으로 획득한 광음향 신호의 신호 대 잡음비(coherent SNR_{chirp})는, 도 7에 나타난 단일 개의 처프 신호를 광 흡수체(20)에 흡수시킨 뒤 획득한 광음향 신호의 신호 대 잡음비(SNR_{chirp})에 비해 크다는 것을 알 수 있다.

[0161] 또한, 도 20에서 알 수 있듯이, 다수 개(예를 들어, 8개 또는 16개)의 상이한 주파수 범위를 갖는 처프 신호를 광 흡수체(20)에 흡수시킨 뒤 비결맞음 합산 방법으로 획득한 광음향 신호의 신호 대 잡음비(incoherent SNR_{chirp})는, 도 7에 나타난 단일 개의 처프 신호를 광 흡수체(20)에 흡수시킨 뒤 획득한 광음향 신호의 신호 대 잡음비(SNR_{chirp}), 그리고 도 19에 나타난 광음향 신호의 신호 대 잡음비(coherent SNR_{chirp})에 비해 매우 크다는 것을 알 수 있다.

[0162] 앞에서는 처리장치(300)가 광원(100)을 통해 방출될 처프 신호의 주파수 구간을 1~5MHz로 설정하였고, 그 주파수 구간 내에서 M=8개 또는 M=16개의 주파수 범위를 동일한 간격으로 선택하였다. 하지만 처리장치(300)는 광원(100)을 통해 방출될 처프 신호의 주파수 구간을 1~5MHz 이외의 구간으로 설정할 수 있고, 주파수의 개수도 얼마든지 다양하게 선택할 수 있으며, 다수 개의 주파수 범위를 반드시 동일한 간격으로 선택할 필요가 없고, 선택되는 다수 개 주파수 범위에서의 주파수 위상 역시 반드시 동일하게 할 필요도 없다.

[0163] 즉, 처리장치(300)가 주파수 구간, 주파수의 선택 개수, 다수 개의 주파수 범위 간 간격 또는 다수 개 주파수 범위에서의 주파수 위상을 앞서 설명한 예와 달리하더라도, 상이한 주파수 범위를 갖는 처프 신호 다수 개를 광 흡수체(20)에 흡수시킨 뒤, 광음향 측정기(200)로 측정되는 광음향 신호를 처리장치(300)가 결맞음 또는 비결맞음 합산 방법으로 처리할 경우에는, 단일 개의 처프 신호를 광 흡수체(20)에 흡수시키는 경우(도 7 참고)에 비해, 광음향 측정기(200)로 측정되는 광음향 신호의 신호 대 잡음비를 향상시킬 수 있음이 확인되었다.

[0164] 이상에서 기술한 실시예들은 모든 면에서 예시적인 것이며 한정적이 아닌 것으로 이해해야만 한다. 본 발명의 범위는 상기 상세한 설명보다는 후술하는 특허청구범위에 의하여 나타내어지며, 청구범위의 의미, 범위 및 등가 개념으로부터 도출되는 모든 변경 내지 변형된 형태는 본 발명의 범위에 포함되는 것으로 해석되어야 한다.

부호의 설명

[0165] 10: 광 확산 매체

20: 광 흡수체

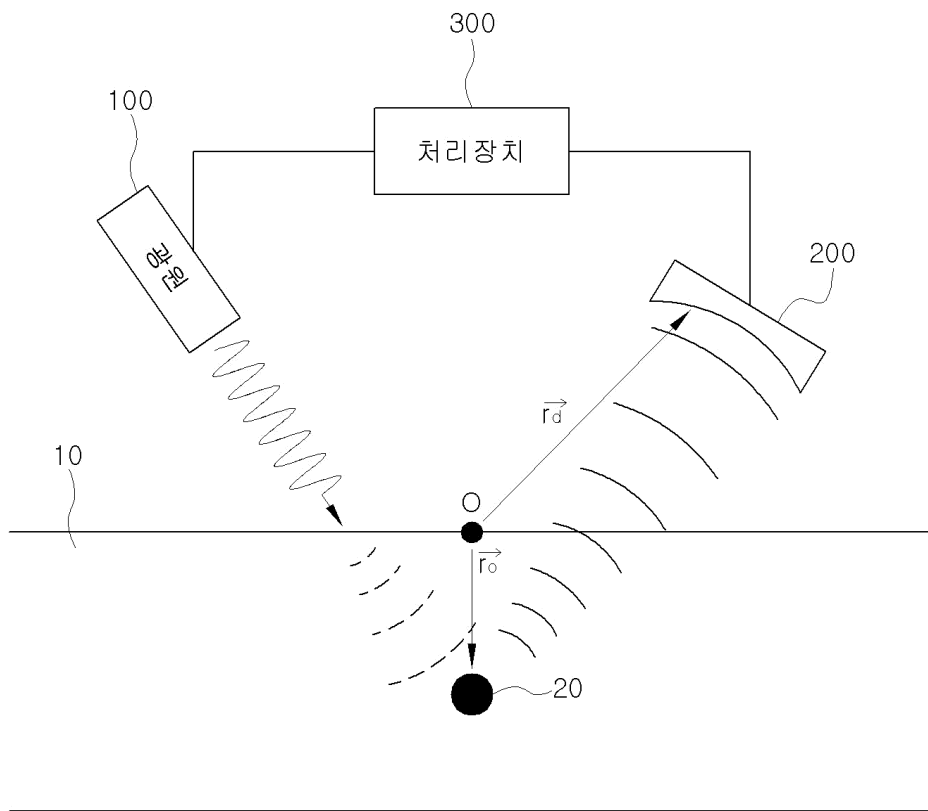
100: 광원

200: 광음향 측정기

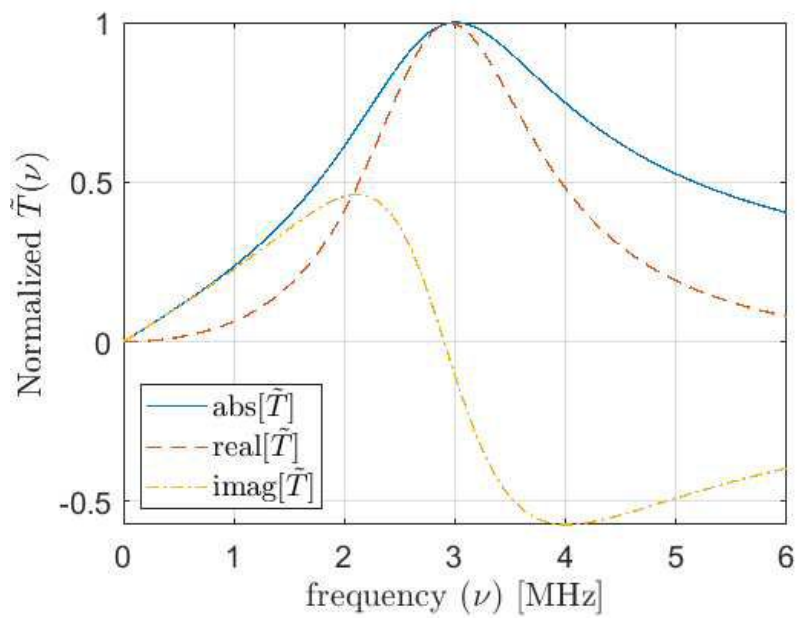
300: 처리장치

도면

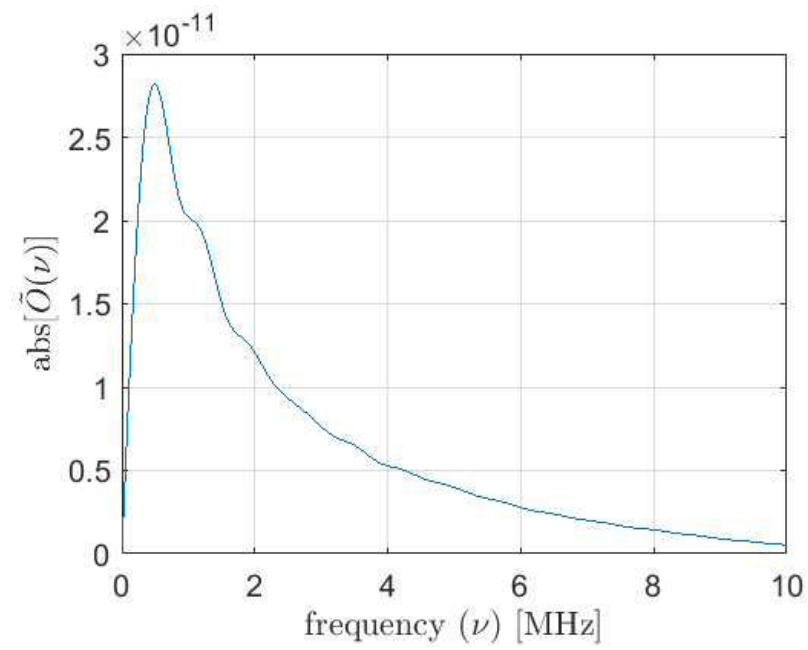
도면1



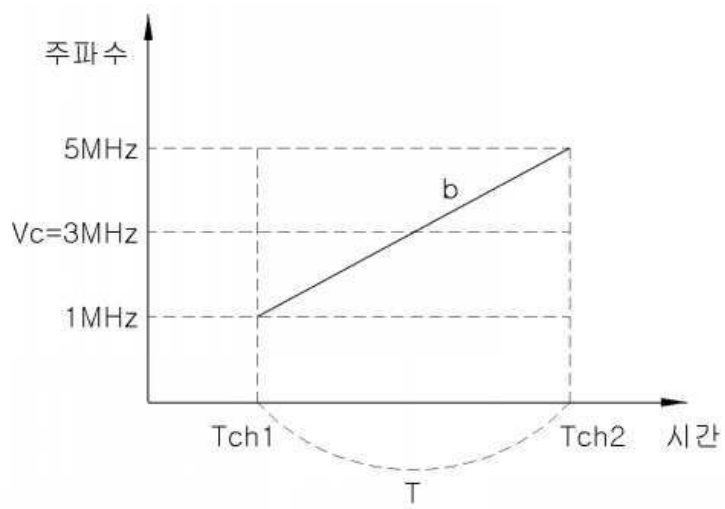
도면2



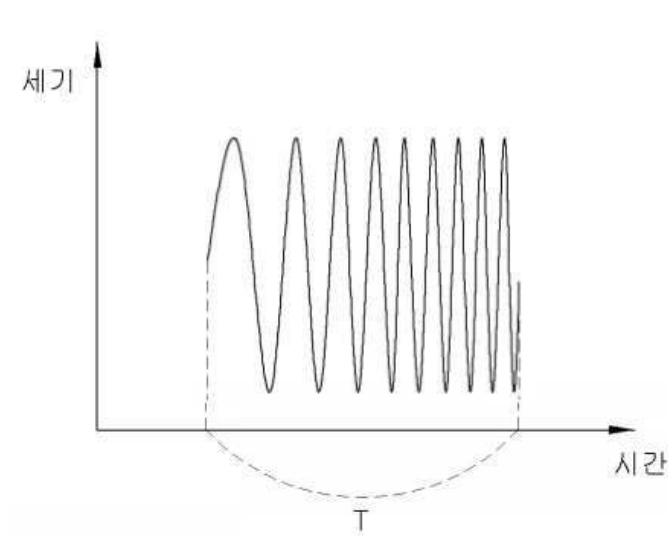
도면3



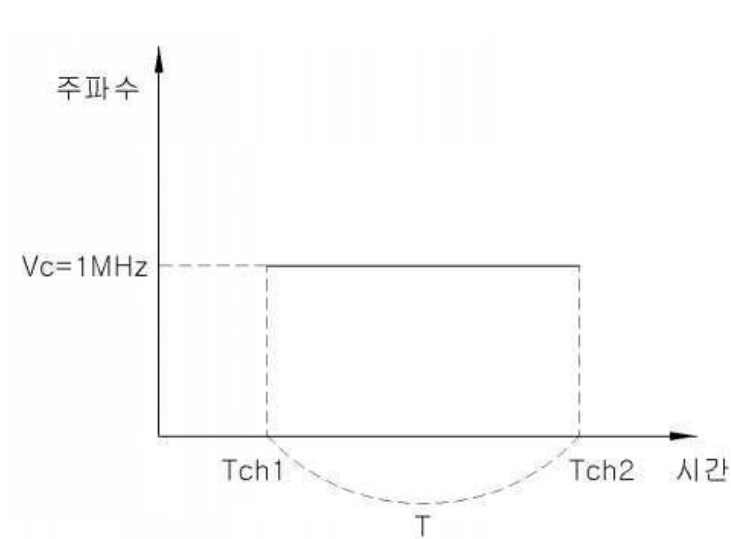
도면4a



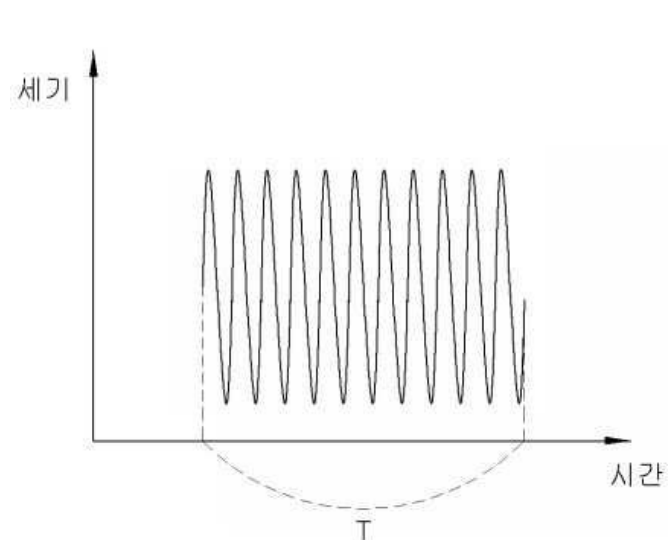
도면4b



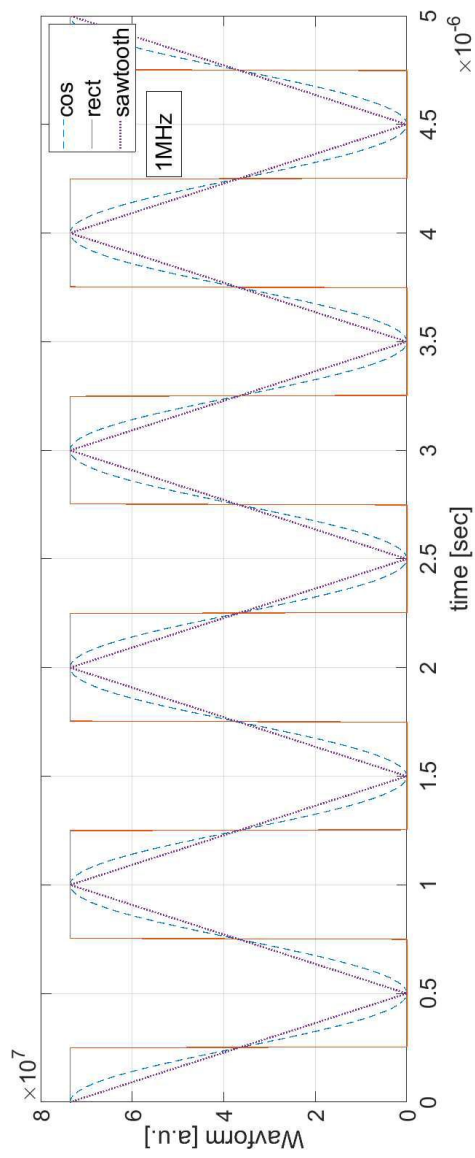
도면5a



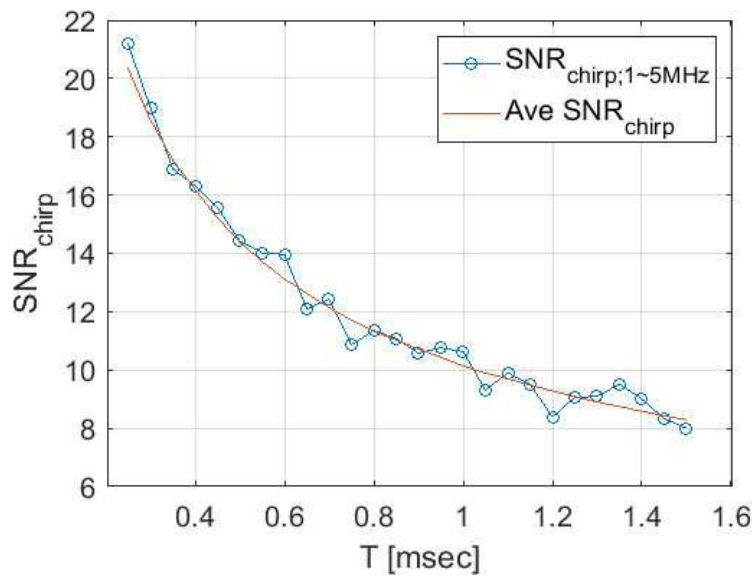
도면5b



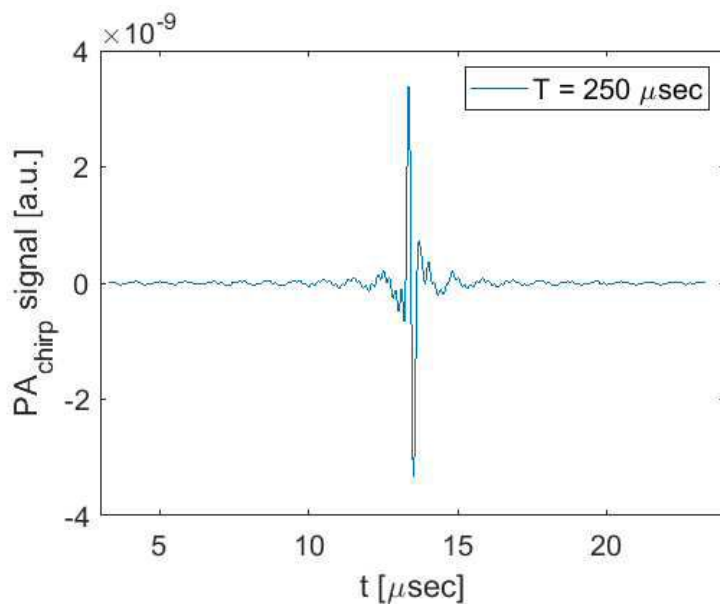
도면6



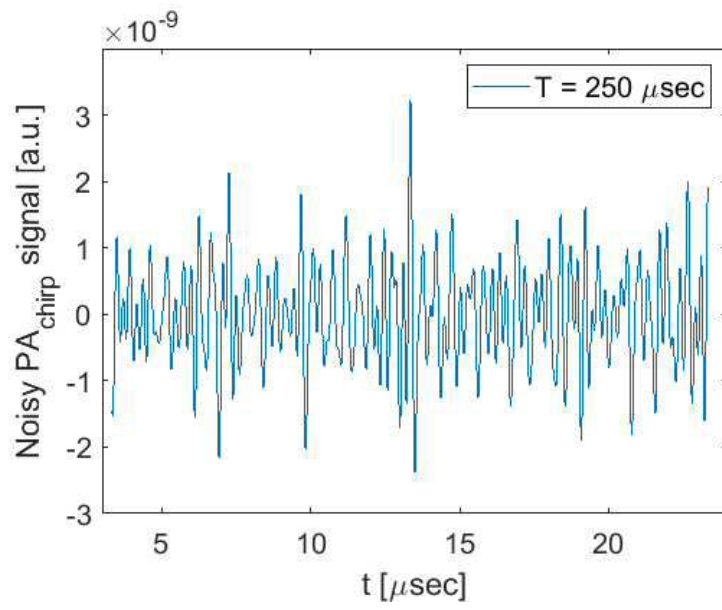
도면7



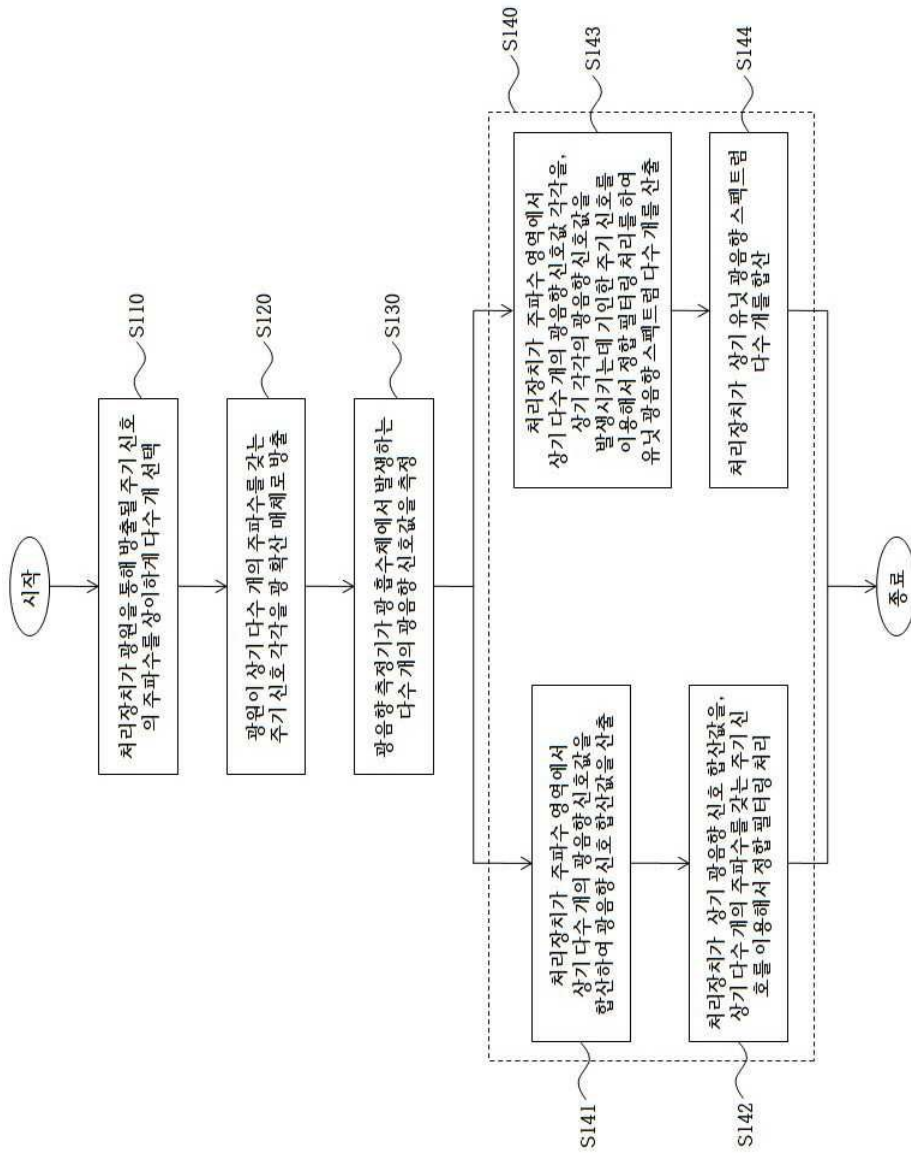
도면8a



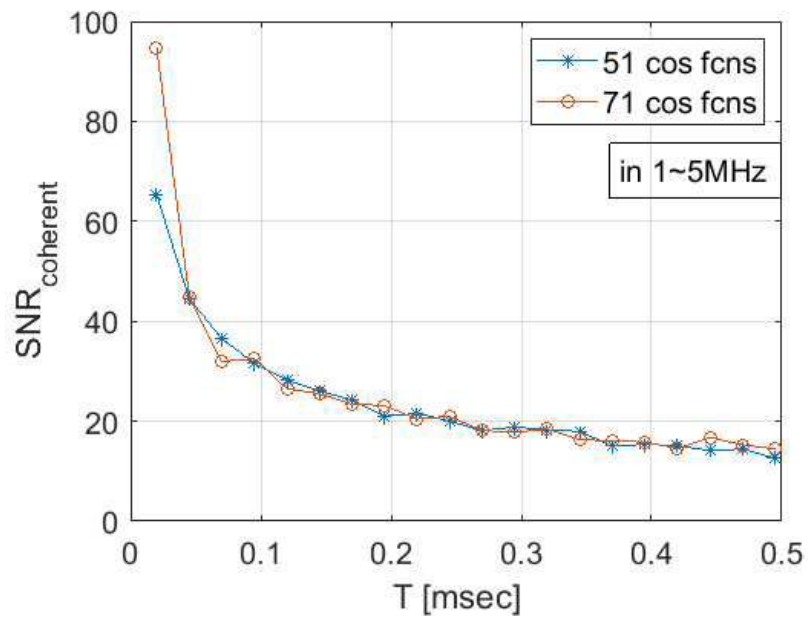
도면8b



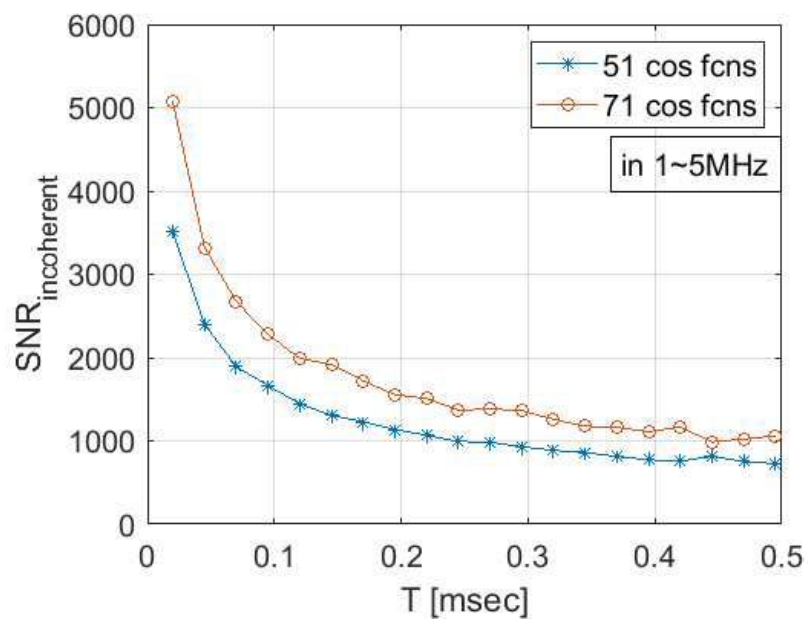
도면9



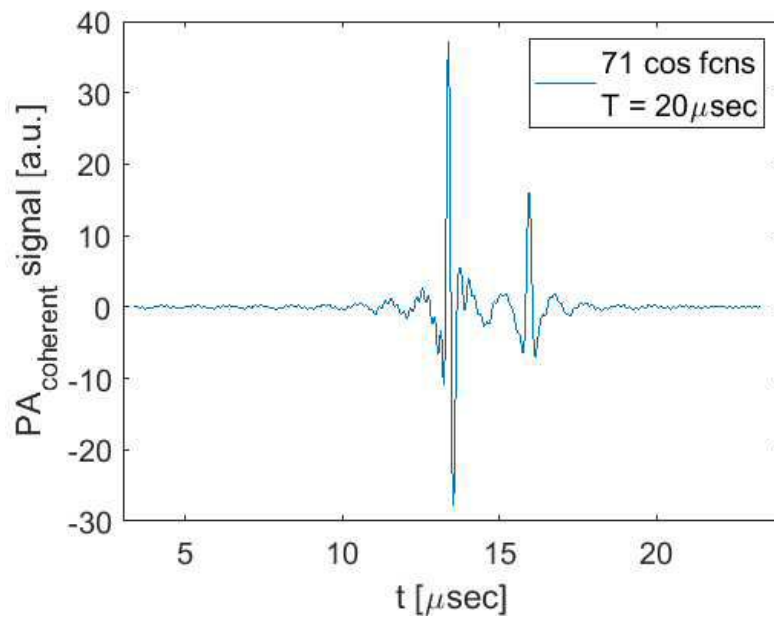
도면10



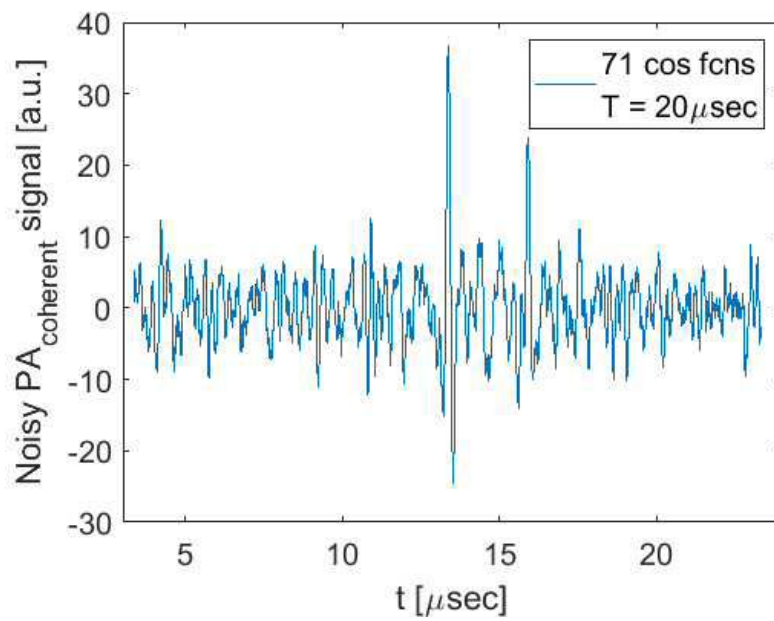
도면11



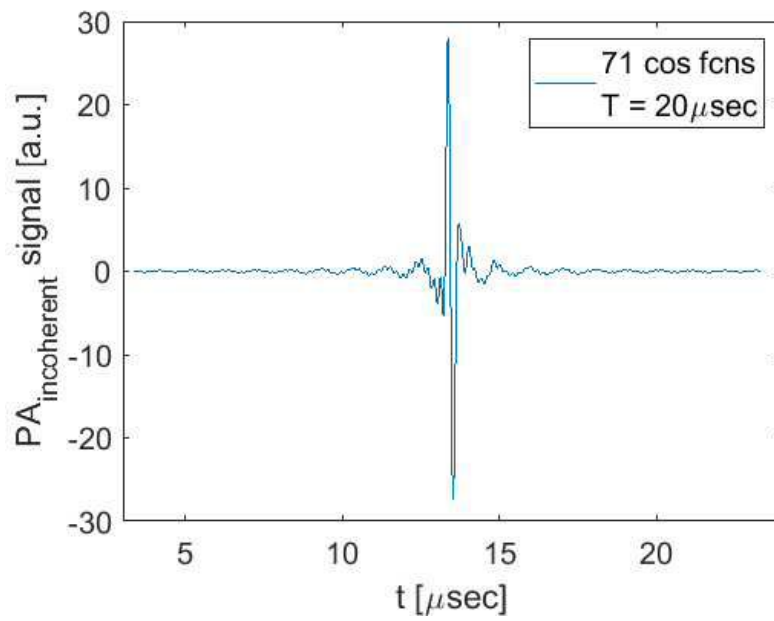
도면12a



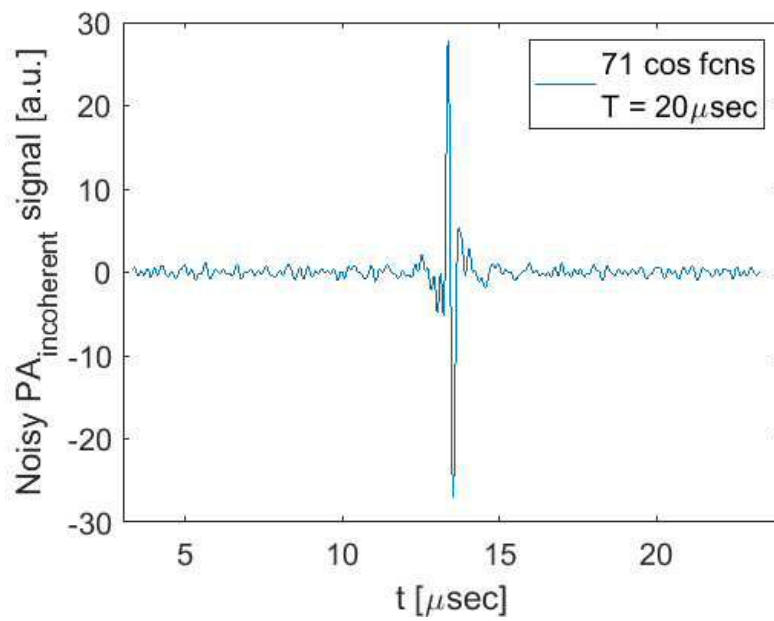
도면12b



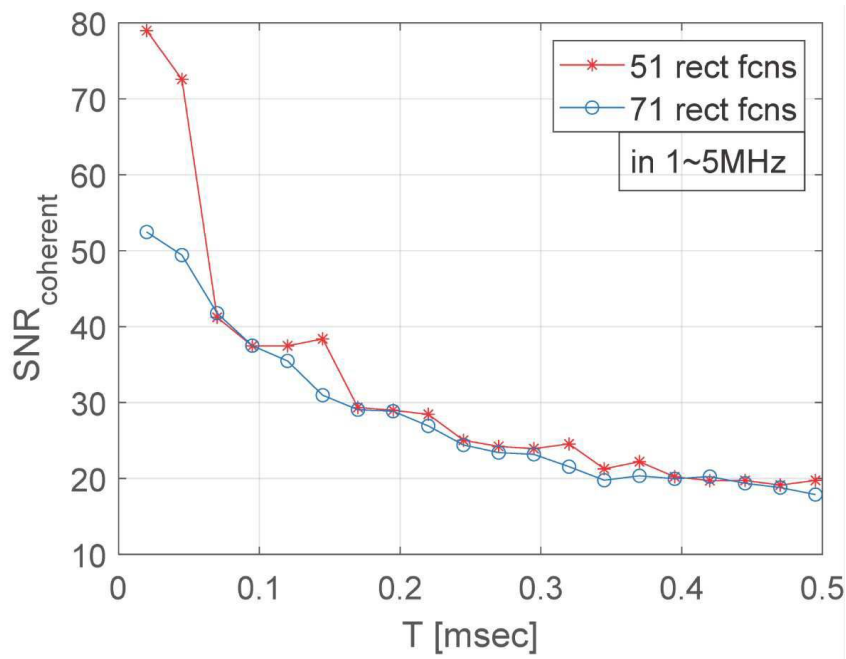
도면13a



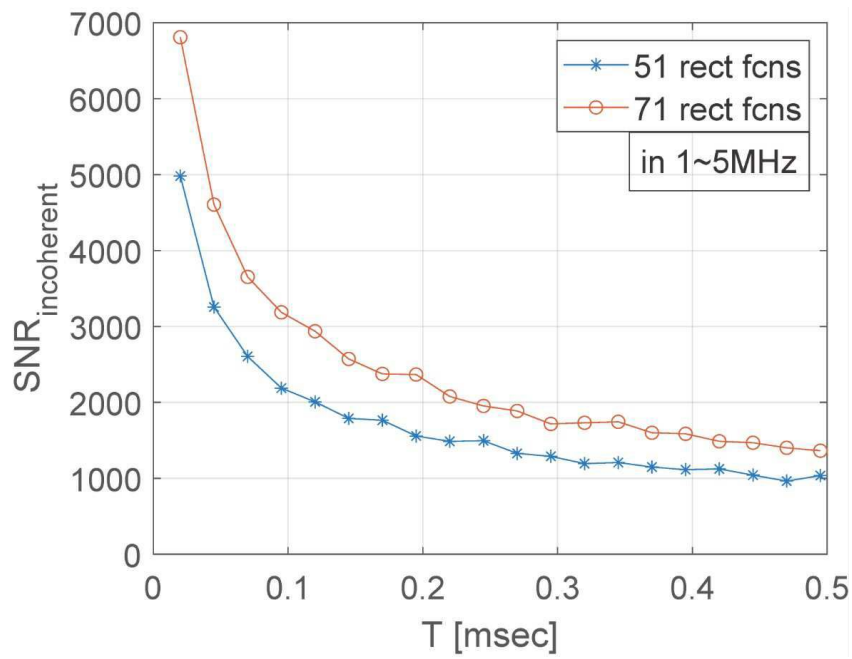
도면13b



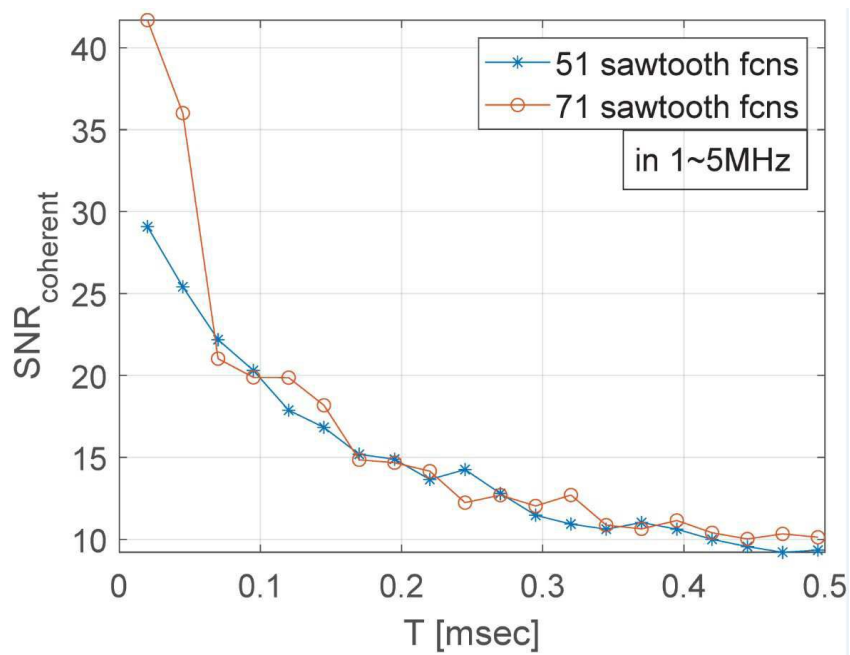
도면14



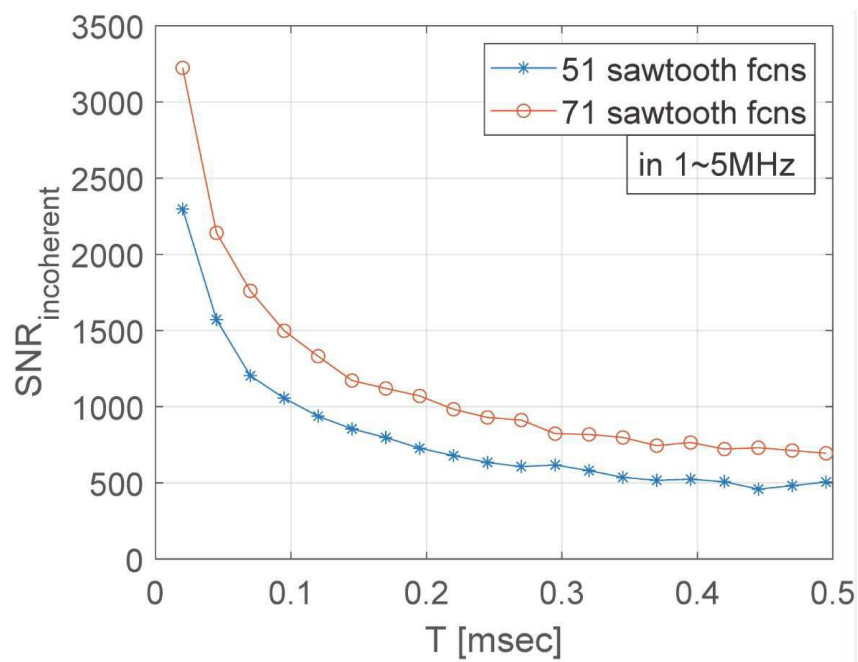
도면15



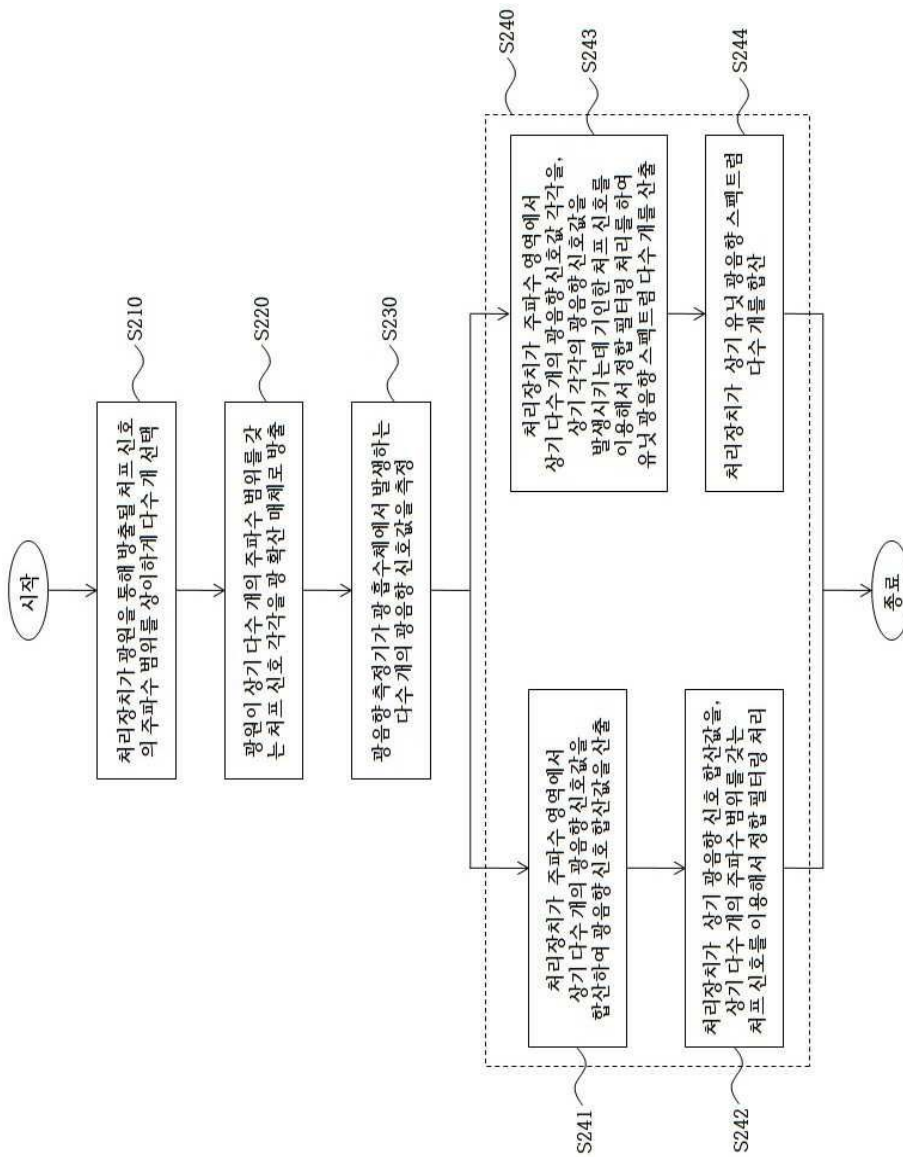
도면16



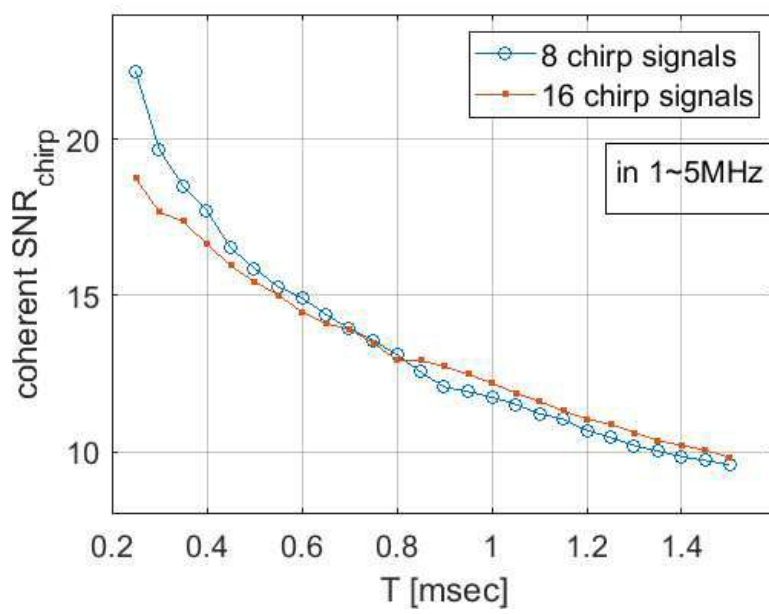
도면17



도면18



도면19



도면20

