

# 웨이브릿 파워 스펙트럼 추정 기술을 이용한 고분해 테라헤르츠 시간영역 분광

## High-Resolution Terahertz Time-Domain Spectroscopy Using a Wavelet Power Spectrum Estimation Technique

김영찬, 이대수, 예종철\*, 안재욱\*\*

한국표준과학연구원 안전측정센터, \*한국과학기술원 바이오및뇌공학과, \*\*한국과학기술원 물리학과  
dsyee@kriss.re.kr

최근 비동시성 광 샘플링 테라헤르츠 시간영역 분광(asynchronous optical sampling terahertz time-domain spectroscopy; AOS THz-TDS)이 시연되었다<sup>(1,2)</sup>. 두 대의 펨토초 레이저를 사용하는 AOS THz-TDS는 모터로 구동되는 선형 스테이지 없이 긴 시간 영역을 짧은 시간동안 측정할 수 있는 장점이 있다. 하지만 긴 시간 영역에서 측정되는 테라헤르츠 펄스는 발생기, 검출기, 및 광학 부품들에서의 다중 반사로 인한 긴 꼬리 신호를 가질 수 있다. 이러한 꼬리 신호는 시간영역 데이터의 푸리에 변환에 의해 얻어지는 스펙트럼에서 노이즈로 작용한다. 본 연구에서는 신호처리 방법 중 하나인 웨이브릿 파워 스펙트럼 추정 기술 (wavelet power spectrum estimation technique; WPSET)을 이용하여 고분해 테라헤르츠 시간영역 분광에서 얻어지는 스펙트럼 상의 노이즈를 제거하였다.

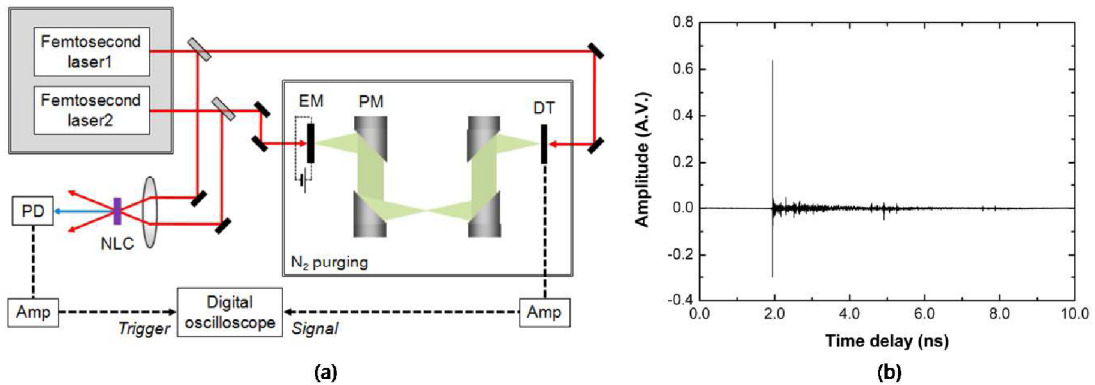


그림 1 (a) 본 실험에서 사용한 AOS THz-TDS 개략도. EM: 테라헤르츠파 발생기, DT: 테라헤르츠파 검출기, PM: 비축 포물경, NLC: 비선형 광 결정, PD: 광검출기, AMP: 전류 증폭기. (b) 본 분광기를 이용하여 측정된 10 ns 시간지연 폭의 테라헤르츠 시간영역 신호. THz 펄스 뒤에 나타나는 긴 꼬리 신호를 볼 수 있다.

그림 1(a)는 본 실험에서 사용한 AOS THz-TDS 장치의 개략도이다. 각각의 펨토초 레이저는 2개의 위상동기 루프(phase-locked loop; PLL)를 사용하여 서로 다른 반복 주파수( $f_1, f_2$ )로 안정화 된다. 고정 주파수를 가지는 dielectric resonator oscillator (DRO)를 사용하여  $f_2$ 는 100 MHz로 고정되며,  $f_1$ 은 주파수가 변신호발생기를 사용하여 가변되어 차주파수  $\Delta f (= f_2 - f_1)$ 를 변화시킬 수 있다. 테라헤르츠파의 발생과 검출은 광전도 안테나(photoconductive antenna; PCA)를 사용하였으며, 비선형 광 결정에서의 합주파수 발생(sum-frequency generation) 방법을 이용하여 트리거용 차주파수 신호를 만들었다.  $\tau = t\Delta f/f_2$ 에 의해서 오실로스코프 상의 실

시간을 시간 지연으로 변환할 수 있다. 여기서  $\tau$ 는 시간 지연이고  $t$ 는 실시간이다.

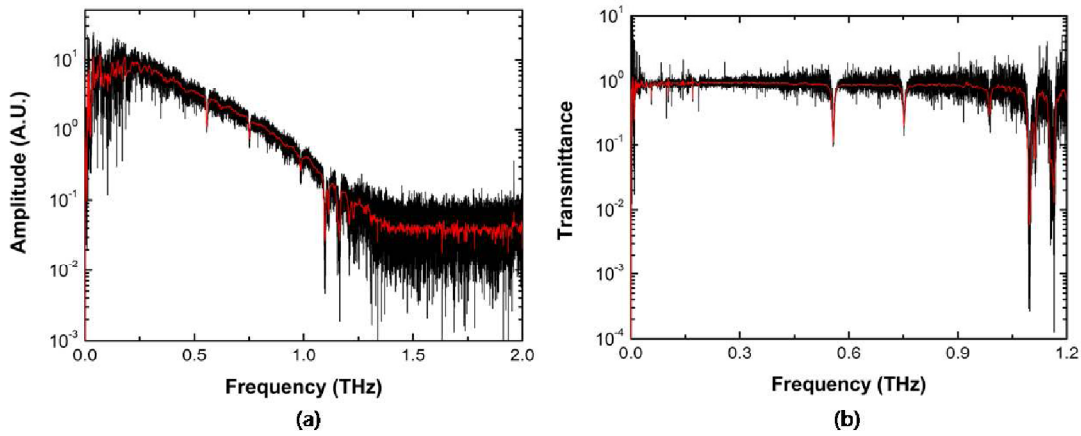


그림 2 (a) 그림 1(b)의 시간영역 신호의 푸리에 변환에 의해 얻은 스펙트럼(검정색)과 그것에 WPSET를 적용한 스펙트럼(빨간색). (b) 추정된 수증기의 투과율 스펙트럼(검정색)과 그것을 WPSET로 신호 처리한 스펙트럼(빨간색).

테라헤르츠 시간영역 데이터의 파워 스펙트럼 추정 문제는 정상적 랜덤 과정(stationary random process)의 비모수 통계 추정 문제(nonparametric statistical estimation problem)로 볼 수 있다. 테라헤르츠 시간영역 신호  $x(t)$ 의 파워 스펙트럼  $S(f)$ 과 그것의 피리오도그램(periodogram)  $I(f)$ 는 수식 (1)과 같이 주어진다.

$$S(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} r(n)e^{-i2\pi n f}, \quad I(f) = \left| \sum_{n=0}^{2N-1} x(n)e^{-i2\pi n f} \right|^2. \quad (1)$$

$r(n)$ 은  $x(n)$ 의 자체상관(autocorrelation) 함수를 나타내며, 이러한 유형의 문제에서는 WPSET 기반의 비모수 접근이 매우 유용하다. 파워 스펙트럼과 피리오도그램의 관계를 임이의 상수  $\gamma$ 를 이용하여 수식 (2)와 같이 나타내었다<sup>(3)</sup>.

$$\ln I\left(\frac{k}{2N}\right) - \gamma = \ln S\left(\frac{k}{2N}\right) + \varepsilon(k), \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2)$$

여기서  $\varepsilon(k)$ 는 0 평균 비가우시안 잡음(zero mean non-Gaussian noise)의 독립동일분포(independent and identically distributed, i.i.d)를 나타낸다. 본 연구에서는  $\ln I(k/2N)$ 를 직교 웨이브릿 변환(orthogonal wavelet transform)에 적용하여 피리오도그램을 서로 다른 크기의 웨이브릿 상수로 분리하여 각 상수를 고정된 문턱값(fixed threshold value)과 비교하여 이 값보다 작으면 0으로 절삭하였다. 최종 스펙트럼은 처리된 웨이브릿 상수의 역 웨이브릿 변환을 통하여 재구성된다. WPSET를 이용하여 처리된 스펙트럼(그림 2)을 통하여 수분 흡수선의 변화 없이 효과적으로 노이즈를 제거한 것을 확인하였다. 결과적으로 일반적인 저역통과필터링(low pass filtering)과 비교했을 때 WPSET는 스펙트럼의 특성을 변화시키지 않으면서 노이즈를 효과적으로 제거하기 때문에 고분해 시간영역 분광에 이상적으로 적용될 수 있다.

참고문헌

1. T. Yasui et al., "Asynchronous optical sampling terahertz time-domain spectroscopy for ultrahigh spectral resolution and rapid data acquisition", Appl. Phys. Lett. 87, 061101 (2005).
2. A. Bartels et al., "High-resolution THz spectrometer with kHz scan rates", Opt. Express 14, 430-437 (2006).
3. P. Moulin, "Wavelet thresholding techniques for power spectrum estimation", IEEE Trans. Signal Proc. 42, 3126-3136 (1994).