

# ヘテロダイン検出を用いたスペクトル干渉法によるシングルショットテラヘルツ波計測

Single-shot THz wave measurement by spectral interferometry based heterodyne detection

高澤 一輝 (M1), 井口 亮太 (B4)

Kazuki Takasawa, and Ryota Iguchi

## Abstract

We demonstrate single-shot terahertz wave measurement with high SNR by spectral interferometry between an EO sampling chirped pulse and a Fourier transform limited reference pulse using heterodyne detection.

## 1. はじめに

電気光学 (EO) サンプリグに基づく時間領域分光法 (TDS) は, テラヘルツ (THz) 波パルスの時間依存電界を測定するための一般的な方法として広く用いられている. TDS での EO サンプリグパルスと THz 波パルス間の遅延時間走査を排除するために, いくつかの方式も提案されている. 周波数チャーププローブレザパルスを使用して, 周波数から時間へのエンコードを利用する方法は, 遅延走査不要の便利な手法である[1]. スペクトル干渉法 (SI) も, 遅延走査が不要でさらに時間分解能も高い便利な手法である. 実際, 直交偏光プローブパルスのバランス検出で計測された時間波形は, シングルショットでも高い SN 比が実証されている[2].

一方, ヘテロダイン検出法は, SN 比が高い方式として TDS 計測用に報告されている[3]. プローブ光は2つのビームに分割され, 入射偏光は結晶軸が $\pm\beta$ 度だけ傾いた 1/4 波長板 (QWP) で変化する. 検光子で 2 つのビーム間の偏光変調の差を検出することで変調度の大きな信号検出が可能になる.

本研究では, 高い SN 比でシングルショット THz 波パルス検出を実現するために, SI 法とヘテロダイン検出の組み合わせを提案し, 実験実証した. この SI 法は, THz 波時間イメージングのシングルショット空間 1 次元計測に拡張することができる.

## 2. 実験セットアップ

### 2.1. ヘテロダイン検出系

Fig. 1 にヘテロダイン検出系の原理を示す[3]. EO サンプリグにより楕円偏光になったプローブ光は2つのビームに分割され, 入射偏光は $\pm\beta$ 度結晶軸が傾いた 1/4 波長板(QWP)を通過することで変調出力される. 次に検光子で2つのビーム間の偏光差を検出する. フォトダイオードで検出された光強度  $I_1$  は次式で表される.

$$I_1(\Gamma, \beta) = \frac{I_0}{2} \left[ \sin^2\left(\frac{\Gamma}{2}\right) \cos^2(2\beta) + \frac{1}{2} \sin^2(2\beta) + \frac{1}{2} \sin(2\beta) \sin\Gamma \right]$$

ここで,  $\Gamma$  は THz 電界によって EO 素子で引き起こされる位相遅延であり,  $\beta$  は QWP の角度である. もう一方の光強度  $I_2$  は,  $I_1$  の  $\beta$  を  $-\beta$  に置き換えることで得られる. THz 電界に比例する信号は,  $I_1$  と  $I_2$  を THz 電界なしの強度で除算し, その差分をとることで次式のように得られる.

$$\frac{I_1(\Gamma, \beta)}{I_1(0, \beta)} - \frac{I_1(\Gamma, -\beta)}{I_1(0, -\beta)} = \frac{2}{\sin(2\beta)} \sin\Gamma$$

この処理により, THz 電界に無関係な項や非線形項がキャンセルされ, バランス検出よりも SN 比の高い検出が可能となる.

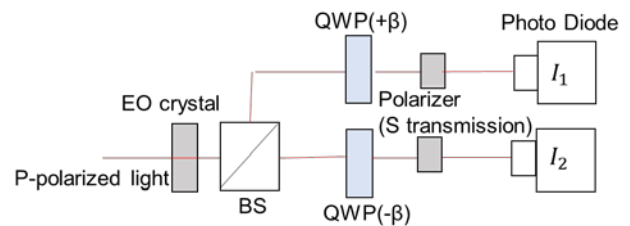


Fig.1 Heterodyne detection system using QWP rotated by  $\pm\beta$

## 2.2. ヘテロダイン検出を用いた SI 法の実験系

Fig. 2 にヘテロダイン SI 法の実験セットアップを示す。光源として再生増幅器からの 800-nm フェムト秒レーザーを使用し、レーザーパルスをチャーププローブ、参照パルス、THz 波発生用のポンプ光の 3 つに分割した。THz 波パルスは LiNbO<sub>3</sub> 結晶を用いた波面傾斜方式で発生させた。THz 波パルスは厚さ 1 mm の ZnTe EO 結晶に入射し、チャーププローブレザーパルスで 2 次元 EO 効果を計測した。

EO 効果により位相変調されたチャーププローブパルスと読み出しパルスは、ヘテロダイン検出系を通過し、角度 $\pm\beta$ だけ傾いた QWP を通過したビームは空間的に分離される。回折格子、シンドリカルレンズ、冷却 CCD からなるイメージング分光器に入射した 2 つのビームは、冷却 CCD 上にそれぞれ干渉縞が生成する。

その結果、回折格子の角度分散方向を波長軸、それに直交した方向を空間軸とした干渉縞画像が得られた。

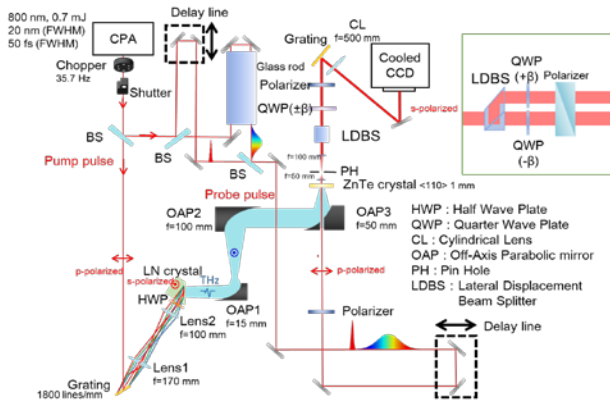


Fig.2 Experimental setup of heterodyne SI scheme.

## 3. 実験結果

### 3.1. シングルショット THz 波 SI フリンジの解析

Fig.3 にシングルショットで得られた SI フリンジの解析の流れを示す。(a)は冷却 CCD におけるシ

ングルショットでの  $\beta = \pm 10$  度の SI 画像である。横軸は波長、縦軸は空間を表す。波長軸方向のデータを抽出し、今回は敢えて空間軸方向で平均化することにより (b) のフリンジ波形を得た。フリンジ波形を周波数の関数に変換した後にフーリエ変換すると、(c) のように時間領域で DC 成分と AC 成分が得られる。AC 成分を抽出して絶対値を取ることでチャープパルスの振幅を得たものが (d) である。THz 波がある場合とない場合の差分を取ることで、THz 波によって誘起されるチャープパルスの振幅変調を取得できる。さらに  $\beta$  が 10 度と -10 度の振幅変調を取得し、その差をとることで、最終的に (e) のように THz 波形が得られた。

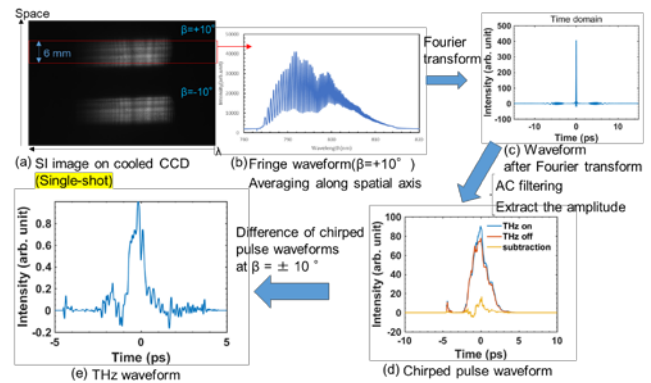


Fig. 3 Analysis of a single-shot THz wave SI fringe

### 3.2. THz 波形とマルチパルス TDS の比較

ロックイン検出を使用して得られたマルチパルス TDS の THz 波形との比較を Fig.4 に示す。さらなる改善が必要であるが、シングルショットヘテロダイン SI 測定は有望な手法だと考えられる。より正確な THz 波形計測を行うには、THz 波の強度をたかくすることと、ノイズの原因となる EO 結晶の局所残留複屈折と散乱の特性を特定して処理する必要がある。

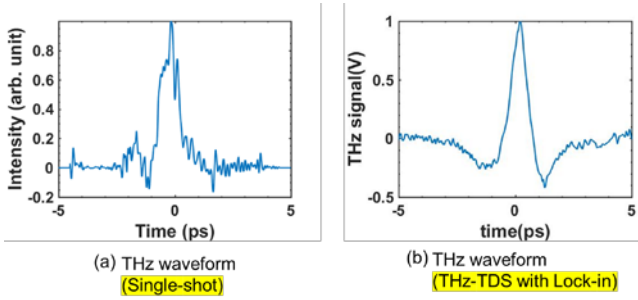


Fig. 4 Comparison of THz waveform with TDS

### 3.2. THz 1D イメージング

ヘテロダイン SI は、THz パルス波形のシングルショット 1D 空間イメージングに拡張することができる。

Fig. 3(a)の SI 画像において、空間軸上の各点で垂直方向に沿って THz 波形を得た。これらを時間、空間、強度の 3 次元プロットで表現することで、Fig. 5 のようにシングルショットで 1 次元空間におけるテラヘルツ波の分布を取得することができる。

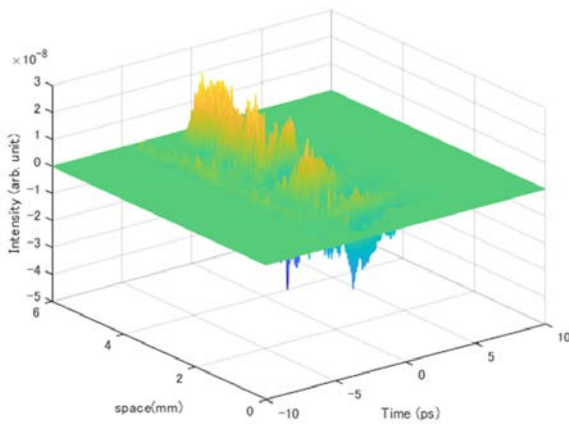


Fig. 5 THz-1D imaging

## 4. まとめ

SI とヘテロダイン検出の組み合わせにより、より高い SN 比でシングルショット THz 波パルス検出を実現できることを示した。ただし、SN の向上に

よる改善が必要である。そのためには、EO 結晶の残留局所複屈折と散乱の特性を決定して処理する必要がある。

## References

1. Z. Jiang *et al.*, “Electro-optic measurement of THz field pulses with a chirped optical beam,” *Appl. Phys. Lett.* **72**, 1945 (1998).
2. S. M. Teo *et al.*, “Invited Article: Single-shot THz detection techniques optimized for multidimensional THz spectroscopy,” *Rev. Sci. Instrum.* **86**, 1 (2015).
3. J. Degert *et al.*, “Simple and distortion-free optical sampling of terahertz pulses via heterodyne detection schemes,” *J. Opt. Soc. Am. B* **33**, 2045 (2016).