

# テラヘルツ波領域シングルショット 2次元ハイパースペクトルイメージングの ためのヘテロダイン型空間 1次元周波数干渉計測

Heterodyne spectral interferometry for single-shot 2D hyperspectral imaging in terahertz wave region

高澤 一輝 (M2), 葉 京武(B4)

Kazuki Takasawa, and Keibu Yo

## Abstract

By combining spectral interferometry (SI) with heterodyne detection, terahertz waveform distribution along one spatial axis was acquired with a single shot EO sampling using a frequency chirped probe laser pulse. The spectral interferometer can eliminate the influence of residual birefringence of EO crystal, and heterodyne balanced detection scheme improves the detection SNR.

## 1. はじめに

多くの有機物の吸収帯がテラヘルツ(THz)波の領域にあることから、テラヘルツ電磁波パルスを用いたイメージングが近年活発に研究されている。これらは化学物質の同定、がん細胞の検出などへも応用することができることから、THz波領域において短時間でハイパースペクトルイメージを得ることが求められる。THz波領域において2次元空間の分光イメージを得ようとすると、電気光学(EO)効果を用いて空間  $(x,y)$  と時間  $t$  において走査しながら繰り返し光パルスプローブ計測をする必要がある。こうして空間上の各点において時間波形を求め、それをフーリエ変換することでスペクトル情報を得る。こういった空間走査型時間域分光法は計測時間が長くなるため、撮影対象も静的なものか動的で再現性のあるものに限定される。そこでシングルショットで2次元空間イメージングする走査不要な手法が求められる。

時間軸方向の走査を無くし、計測時間を短くする

ための工夫として、プローブ光として周波数チャープパルスを用い、分光器を検出器として使うことでスペクトルエンコーディングを利用して単一パルスで THz 波の電界波形を計測する方法[1]や周波数干渉法 (SI) を用いた方法[2]が考案されている。これらは有望な方法であるが、いずれも空間 1次元までの情報しか得られないため、空間 1軸において走査することが必要であり、現状ではシングルショットで THz 波領域 2次元ハイパースペクトルイメージングをすることがまだ出来ていない。また、高強度な THz 波光源を除いては、一般に THz 波検出は SN 比が低く、パルスを重ね撮りして計測しているため、シングルショット計測を達成するには SN 比の改善が大きな課題となる。

本研究では、THz 波計測の SN 比を向上させるために、SI に新たにヘテロダイン検出[3]を組み合わせたことを行った。これにより高い SN 比で検出ができ、シングルショットでも THz 波計測可能なことを実験的に実証する。また、イメージング分光器の周波数軸と直交した空間 1次元を一括計測できるため、テラヘルツ波形の 1次元分布を単一ショットで取得可能であり、時間波形をフーリエ変換することでスペクトルも取得可能なことを示す。

## 2. 実験方法

周波数干渉法を適用した THz 波計測を行うにあたり、Fig. 1 に示すセットアップを構築した。周波数チャープ増幅器で増幅したフェムト秒レーザーパ



ねて遅延時間を与え、SSI の場合は角度をつけて重ねて遅延時間は与えない。±β で光軸の高さが異なるため、このように1つの画像に2つの干渉縞が得られる。この干渉縞を解析し、それぞれチャープパルスの波形を求めることで THz 波計測を行うことができる。原理的に SSI の方が周波数分解能を高くできるが、参照光を ZnTe 結晶を通すのが光学配置上できなかった。

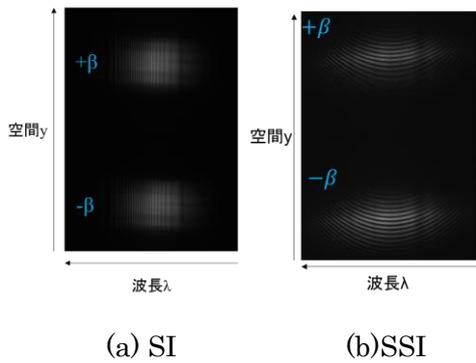


Fig. 2. Spectral interference fringe on the cooled CCD

### 3. 実験結果

±β それぞれについて THz 波の有無におけるチャープパルスの波形を干渉縞解析から求め、ヘテロダイン検出の式である (1) 式の光強度としてチャープパルス波形を適用することで、THz 時間波形を求めることができる。ここで  $\Gamma$  は THz 電界によって誘起される位相リタデーションである。

$$\begin{aligned} \Delta I_{THz} &= \frac{I_1(\Gamma, \beta)}{I_1(0, \beta)} - \frac{I_1(\Gamma, -\beta)}{I_1(0, -\beta)} \\ &= \frac{2}{\sin(2\beta)} \sin\Gamma \end{aligned} \quad (1)$$

まずは SSI による THz 波再構築を行った。Fig. 3 は空間軸の中心 ( $y=0$ ) におけるテラヘルツ波の時間波形を取得した結果である。測定方法として通常検出を用いた SSI, バランス検出を用いた SSI, ヘテロダイン検出を用いた SSI で行って比較し、それぞれシングルショットとマルチショット (50 パル

ス) で計測した。

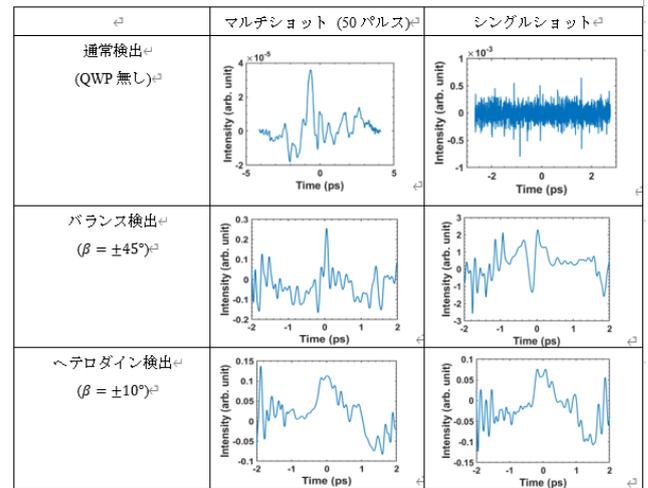


Fig. 3. Results of terahertz waveform measurement using SSI ( $y=0$ )

結果としては、クロスニコル型通常 SSI 検出やバランス検出 SSI では SN が悪く計測できない THz 波形が、ヘテロダイン SSI 検出であれば THz 波形がシングルショットでも概形としては出ているが、重ね撮りであっても全体的に波打っている。SSI の場合 THz 波形を求めるのに 3 回のフーリエ変換が必要であり、そこから高精度な波形再構築するには、現状の THz 波強度 (0.14 kV/cm) では SN 比が不十分であったと考えられる。

次に SI による、空間軸の中心 ( $y=0$ ) における THz 波の時間波形を再構築した。測定方法として通常検出を用いた SI, バランス検出を用いた SI, ヘテロダイン検出を用いた SI で行って比較し、それぞれシングルショットとマルチショット (100 パルス) で計測した。その結果が Fig. 4 である。ヘテロダイン検出の場合はシングルショットでもマルチショットと SN 比としては大差なく、THz 波形を確認することができる。クロスニコル型通常 SI 検出とバランス SI 検出に関しては、マルチショットでも波形が確認できず、現状の THz 波強度では SN 比が不十分なためだと考えられる。SSI と比べて SI の

方が SN 比が高い理由として、EO 結晶における残留複屈折・散乱分布の影響[4]が考えられる。これらが空間的に分布しており、EO サンプリングを用いた計測においてノイズの原因となる。SSI の場合、プローブ光と参照光は EO 結晶の同一箇所を通過できないため、それぞれのビームでノイズの空間分布が異なり、波形再構築の上で問題となる。しかし SI であれば、プローブ光と参照光が EO 結晶の同じ位置を通過するため、干渉計測によって残留複屈折成分はキャンセルされる。また、散乱についても THz 波の on/off の比をとることでキャンセルされるため、EO 結晶由来のこれらのノイズを抑えることができる。

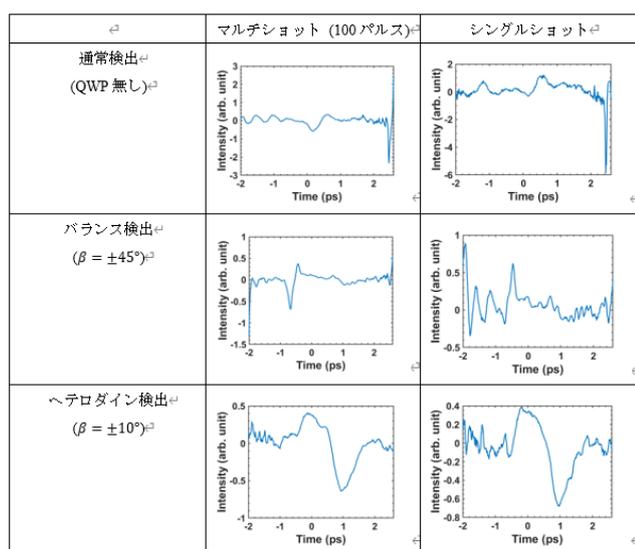


Fig. 4. Results of terahertz waveform measurement using SI ( $y=0$ )

SI 計測において空間軸の中心だけでなく、他の空間上の点についても同様に波形再構築し、空間軸方向に並べることで空間 1 次元における THz 時間波形を取得することができる。Fig. 5 はシングルショットヘテロダイン SI 計測から取得した、代表的に空間上の 5 点 ( $y = -1.5 \text{ mm}, -1 \text{ mm}, 0 \text{ mm}, 1 \text{ mm}, 1.5 \text{ mm}$ ) における時間波形である。このように各空間上の点においてそれぞれ THz 時間波形を取得でき

る。ここでは代表的な点のみ波形を掲載したが、 $59.2 \mu\text{m}$  間隔 ( $y$  軸方向 CCD ピクセル 8 個分の平均) で任意の空間上の点における時間波形を取得することができる。

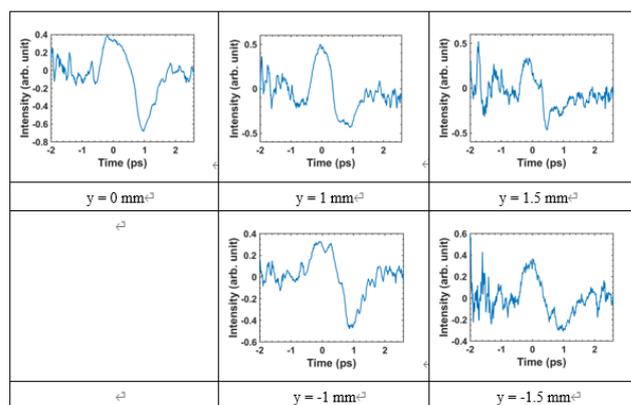


Fig. 5. Terahertz time waveform in each space ( $y = 0 \text{ mm}, \pm 1 \text{ mm}, \pm 1.5 \text{ mm}$ )

また、Fig. 6 は各空間における時間波形を空間軸上に全て並べることで取得した、THz 時間波形の空間 1 次元分布である。x 軸が時間、y 軸が空間、z 軸が強度を表す。時間軸方向に見るとさきほど取得した空間上の点における時間波形のふるまいをしている。空間軸方向に見ると中心にピークが立ち、裾にいくにつれて減衰していく様子が見て取れる。

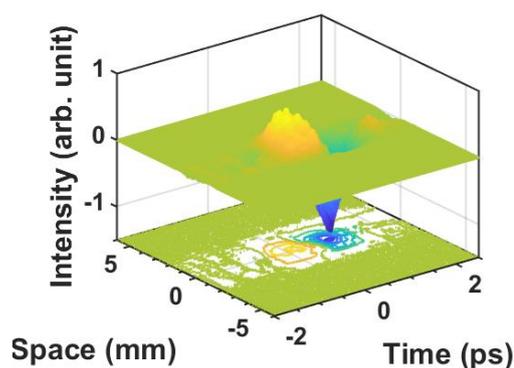


Fig. 6. Terahertz time waveform in one dimension of space (single-shot heterodyne SI)

また、各空間における時間波形をフーリエ変換することでスペクトルを得ることができる。こうして

得たスペクトルが Fig. 7 である。空間軸の中心から外側に行くにつれて、広帯域になっていることが読み取れる。よって THz 波集光点の中心よりも外側に行くにつれて、高周波成分が分布していると考えられる。

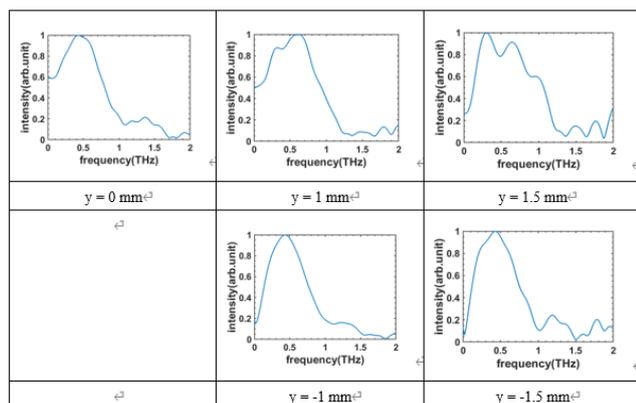


Fig. 7. Terahertz spectrum in each space ( $y = 0 \text{ mm}, \pm 1 \text{ mm}, \pm 1.5 \text{ mm}$ )

次に、Fig. 8 のプラスチックバッグに入ったラクトース (乳糖) をサンプルとして、空間 1 次元におけるスペクトル計測を行った。ラクトースは 0.5 THz 付近に吸収ピークを持つ物質である。



Fig. 8. Lactose in a plastic bag.

光学系としては Fig. 1 のままで、コリメートしたテラヘルツ波ビーム (テラヘルツレンズの前) の位置にラクトースを置いて、シングルショットヘテロダイン SI によってテラヘルツ波計測を行う。こうしてラクトースの透過スペクトルを計測した結果が Fig. 9 である。

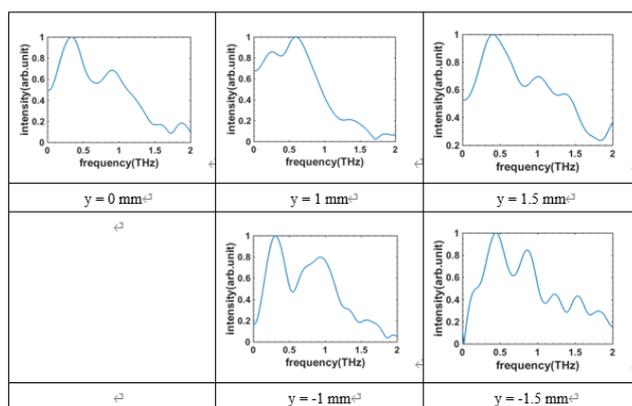


Fig. 9. Transmission spectrum of lactose ( $y = 0 \text{ mm}, \pm 1 \text{ mm}, \pm 1.5 \text{ mm}$ )

実験配置上、ラクトースの存在する領域である  $y = 0 \text{ mm}, -1 \text{ mm}, -1.5 \text{ mm}$  に関しては、0.5 THz 付近における吸収が明確に確認できる。

#### 4. まとめ

周波数干渉法 (SI) にヘテロダイン検出を組み合わせることで、THz 波計測における SN 比が著しく向上することを実証した。THz 波強度が弱い場合、通常検出やバランス検出では SN 比が不十分であり、マルチショットでも計測できないが、ヘテロダイン検出であれば空間分解したシングルショット計測でも可能であった。

また、空間分解した計測が可能のため、空間上の任意の点における THz 時間波形を取得でき、各空間における時間波形を求めて並べることにより、空間 1 次元における THz 時間波形やフーリエ変換すればスペクトルが取得可能である。

#### References

- [1] Z. Jiang and X. C. Zhang, "Electro-optic measurement of THz field pulses with a chirped optical beam," *Appl. Phys. Lett.* **72**, 1945–1947 (1998).
- [2] S. M. Teo, B. K. Ofori-Okai, C. A. Werley, and K. A. Nelson, "Invited Article: Single-shot THz detection

techniques optimized for multidimensional THz spectroscopy," *Rev. Sci. Instrum.* **86**, 1–17 (2015).

[3] J. Degert, M. Cornet, E. Abraham, and E. Freysz, "Simple and distortion-free optical sampling of terahertz pulses via heterodyne detection schemes," *J. Opt. Soc. Am. B* **33**, 2045 (2016).

[4] T. Hattori and M. Sakamoto, "Deformation corrected real-time terahertz imaging," *Appl. Phys. Lett.* **90**, 261106 (2007).