

周波数チャープパルスを用いた圧縮センシングによる

周波数-時間計測の空間二次元拡張

2D Compressed Sensing with Chirped pulse

葉 京武 (B4), 高澤一輝(M2)

Keibu Yo and Kazuki Takasawa

Abstract

To achieve single-shot 2D THz imaging, first, we employ 1D imaging scheme with EO sampling and spectral interferometry. Then CUST (Compressed ultrafast spectral-temporal photography) is combined. We find significant redundancy in CUST scheme to reconstruct images from spectrally overlapped images.

1. はじめに

THz 波は紙やプラスチックなどの多くの物質を透過する一方で、様々な有機物に特有の吸収スペクトルを持つ。故に、THz 波は検査や分光計測の分野に大きな効力を発揮することが期待されている。しかし、THz 波強度は非常に微弱であり、直接検出するのは容易ではない。従来の検出方法として、THz 電磁波によって誘起されたEO効果をフェムト秒レーザーパルスを用いて時空間的に点走査する方法や、周波数チャープパルスを用いて時間軸上で一括計測して空間的に走査する計測法が存在する。後者の方法は、時間一波長変換により単一ショットでの空間一次元計測が原理的に可能なので、さらに圧縮センシングを用いることで、空間的二次元計測に拡張できる可能性がある。この拡張手法は、CUST[1]として先行研究が報告されている。

そこで本研究では、まず近赤外領域における圧縮センシングイメージ技術 CUST[1]の追試を行った。この方法は、周波数チャープパルスにランダム擬似2値パターンを印加し、各波長成分における変換行

列をあらかじめ観測しておくことで、重なり合ったイメージからその波長に対応する成分を TwIST[2]を用いて再構築する方法である。

2. 圧縮センシングについて

2.1. 圧縮センシングの数理

自然界において、高周波成分を0とみなすことができる現象が統計的に多いことがわかっている。高周波成分がノイズとして振る舞っているものも少なくないが、現象の本質は非常に少ない要素によって構成されている、という考えに基づいている。

例として画像について考える。例えば、“隣り合っている画素は似ていることが多い。”これは、画素値が低周波成分に大きく現れており、画素間の局所相関が高いことを表している。また、画素値が急に変わる部分、エッジは一次元的に繋がっていることが多い。このように、画像は”全変動”と”ウェーブレット”の観点からスパース、つまりほとんどが0として重要な情報を含んでいない、と捉えることができる。

圧縮センシングでは、未知の解 \mathbf{x} をスパースであると仮定し、観測行列 \mathbf{K} と観測結果 \mathbf{y} から推定する問題であり、以下の式で表される。ただし、 \mathbf{n} は観測雑音を表している。

$$\mathbf{y} = \mathbf{K}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (1)$$

2.2. 再構築アルゴリズム TwIST

TwIST では以下のような式で、 $f(x)$ が最小となるような x について解くアルゴリズムである。ただし、 λ は正則化係数であり、ノイズ除去関数 $\Phi(x)$ の重みづけの役割を持つ。ノイズ除去関数 $\Phi(x)$ には全変動が用いられており、スパースな次元であるエッジを抽出している。

$$f(x) = \frac{1}{2} \|y - Kx\|^2 + \lambda \Phi(x) \quad (2)$$

この式を解くために、TwIST では以下の反復で x を収束させている。ここで、 α と β は

$$x_1 = \Gamma_\lambda(x_0) \quad (3)$$

$$x_{t+1} = (1 - \alpha)x_{t-1} + (\alpha - \beta)x_t + \beta\Gamma_\lambda(x_t) \quad (4)$$

ただし、 Γ_λ は以下の式で表される。ここで、 Ψ_λ はノイズ除去関数を表している。

$$\Gamma_\lambda(x) = \Psi_\lambda(x + K^T(y - Kx)) \quad (5)$$

3. 実験系

フーリエ分光面に設置されたカメラ上のイメージは、単一波長におけるイメージが回折格子による波長分散により、他波長と重なりあっている状態で観測される。この他波長との重なりを軽減するための光学的設計を行った。本研究での、Object に当たった後の光路の実験系を Fig. 1 に示す。

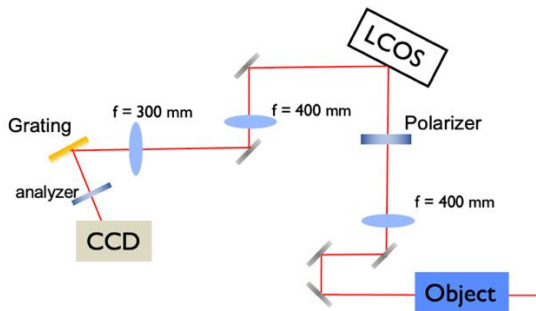


Fig.1 Experimental setup of CUST scheme.

Object の情報はレンズにより LCOS 上にイメージリレーされる。LCOS では、電圧を印加することによりピクセル単位での位相変調を行うことができる。LCOS の前の偏光板と後の検光子をクロスニコルに配置し、LCOS のパターンを 0 位相と π 位相にパターンとして配置することで、周波数チャープパルスにランダム擬似 2 値パターンを印加することができる。

LCOS を通った後に、回折格子を用いた $4f$ 光学系を通してカメラ上に結像される。ここで、カメラ上における各波長成分の、他波長との重なりは、ビーム径を小さく、かつ回折格子前のレンズの焦点距離を長くすることで軽減することができる。また、LCOS のピクセルサイズ $10.7 \mu\text{m} \times 10.7 \mu\text{m}$ と冷却 CCD のピクセルサイズ $7.4 \mu\text{m} \times 7.4 \mu\text{m}$ のサイズを同じ大きさになるように、 $4f$ イメージ系のレンズの焦点距離を選択した。

単一波長成分の変換行列を求める際には、Fig. 2 のようなスペクトル整形光学系を用いて、スリット幅を $20 \mu\text{m}$ にすることでスペクトル幅 0.2 nm の範囲での情報を取得した。

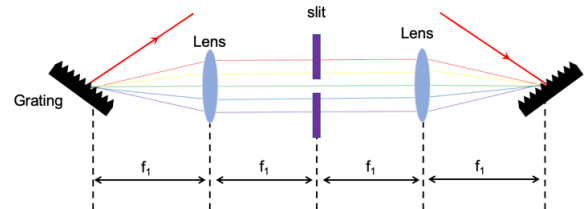


Fig.2 Spectral-shaping module

4. 実験結果

今回使用したターゲットの中心波長 794 nm 、スリット幅を $20 \mu\text{m}$ に設定した時に得られた CCD の画像と、その波長幅において観測されたターゲットと変換行列を次の Fig. 3 にそれぞれ示す。

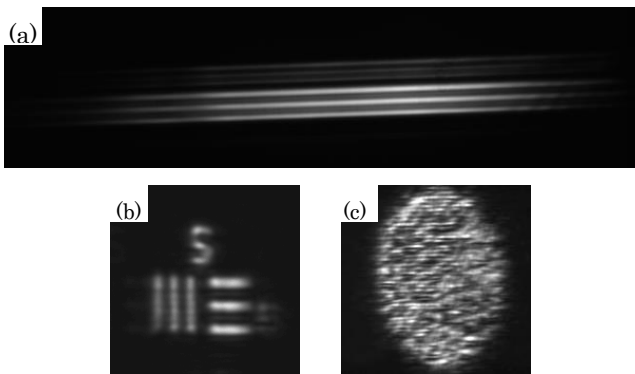


Fig.3 (a) The image on CCD. (b)The target image on CCD at 794 nm. (c)The transform matrix image on CCD at 794 nm.

これらのデータを事前情報として TwIST を用いて単一波長情報を取り出す再構築を行った。Fig.3(b)、(c)には中心波長 794 nm の位置情報も含まれているため Fig.3(a)を観測結果 y 、Fig.3(c)を観測行列 K として、Fig.3(b)のようなターゲット画像の再構築を試みる。TwIST のアルゴリズムにおいて、正則化係数 $\lambda = 1$ とした時の再構築画像を Fig. 4 に示す。Fig. 4 に示すようにターゲットの形状を完全に再構築することはできず、強度情報もうまく再構築することができなかった。

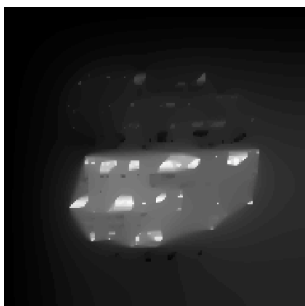


Fig.4 Reconstructed image

5. まとめ

本研究では、CUST の追実験を主な目的として実験を行った。CUST との違いは、擬似ランダム 2 値パターンを DMD ではなく LCOS によって作成して

いる点である。しかし、位相変調を用いた LCOS では、本来 0 になるはずの領域が微小な透過をしており鮮明な変換行列を求めることが困難であった。

また、再構築に関しても複雑なターゲットを再構築することは困難であると考えられる。正則化係数 λ の大きさによって再構築の質が決まり、うまく再構築されなかったり強度情報が失われる可能性が高いためである。

以上を踏まえ、微弱な THz 波の二次元イメージングを行う上で、ヘテロダイン等の技術を併用しなければ実用性は乏しく、併用したとしても単純な形状のイメージングにしか適用できないと考えられる。結論として CUST そのもの動作に極めて疑問を呈することになった。

References

- [1] Y. Lu, T. T. W. Wong, F. Chen, and L. Wang, "Compressed ultrafast spectral-temporal photography," *Nat. Phys. Rev. Lett.* **122**, 1–4 (2019).
- [2] J. M. Bioucas-dias, M. A. T. Figueiredo, S. Member, and A. Iterative, "A new twist," *Total Telecom* 3 (2007).