

# テラヘルツ時間領域分光イメージングのための 圧縮センシングの原理に基づく多層構造解析 Compressed Sensing Based Super-Resolution Layer Structure Analysis for Terahertz Time-domain Spectroscopic Imaging System

森本 隼丈丸<sup>1</sup>、木寺 正平<sup>1, 2</sup>

1. 電気通信大学 大学院情報理工学研究所, 2. 国立研究開発法人科学技術振興機構, さきがけ

Morimoto Hayatomomaru<sup>1</sup>, Kidera Shouhei<sup>1, 2</sup>

1. Graduate School of Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications,  
2. JST, PRESTO

E-mail: morimoto.hayatomomaru@ems.cei.uec.ac.jp, kidera@uec.ac.jp

## 1 はじめに

テラヘルツ波は数 mm 程度の透過性と高い空間分解能から、産業製品の異物検査、危険物所持検査、皮膚癌検知等を目的とした表層内部の非破壊計測に有用である。同技術による画像化手法の最重要課題の一つとして、薄膜の厚さ推定等における多層構造解析がある。一方で、深さ方向の分解能はテラヘルツ波パルスの帯域幅で決定されるため、信号処理技術を用いた超分解能化が求められている。超分解能法の一つとして、圧縮センシング (CS: Compressed sensing) の原理に基づく手法が信号処理分野において提案され、マイクロ波、テラヘルツ波領域での有効性が確認されている [1][2]。一般に、対象表面がレンズの焦点位置から外れた場合波形が歪み、同歪みにより CS による距離分解能が劣化するという問題点がある。本稿では、各深度における参照信号を観測し、同信号を CS 法における参照波形とすることで距離分解能が改善されることを、テラヘルツ時間領域分光装置 (THz-TDS: Terahertz time domain spectroscopy) を用いた実験データにより検証する。

## 2 圧縮センシングによる超分解能距離測定

送受信一体型素子と分散性・損失性誘電媒質を配置する。観測される信号  $y(t)$  は次式で表現される。

$$y(t) = \sum_{i=1}^N s_i(t) \delta(t - \tau_i) \quad (1)$$

ここで、 $s_i(t)$  は  $i$  番目の目標からの反射信号、 $\tau_i$  は遅延時間である。媒質の伝播速度  $c$  を用いて距離  $R = c\tau_i/2$  を計測する。 $x$  を目的関数とする。同目的関数は式 1 の通り、有限個のデルタ関数列で表現されるため、 $l_1$  ノルム正則化により次式で再構成する。

$$\hat{x} = \arg \min_x (\|y - A(\tau_i)x\|_2 + \lambda \|x\|_1) \quad (2)$$

ここで、 $y$  は受信信号、 $A(\tau_i)$  は各深度  $R_i = c\tau_i/2$  で観測した参照信号で構成される観測行列、 $\lambda$  は正則化係数である。

## 3 実験的検証

図 1a に THz-TDS 測定で用いた実験の観測モデルを示す。送信信号の中心周波数は 0.131 THz、帯域幅は 0.121 THz である。焦点距離 25 mm の送受信一体型の誘電体レンズを  $7.5 \text{ mm} \leq x \leq 24.5 \text{ mm}$  の範囲で直線的に走査し、等間隔で 70 点サンプルする。一層目は比誘電率 2.779、厚さ 0.5 mm のポリエチレンテレフタレート (PET: Polyethylene terephthalate) であり、二層目は硬質塩化ビニル (PVC: Polyvinyl chloride) である。

図 1b にレンズから PET 表面までの距離が 31 mm の場合の受信信号を示す。同図から距離方向の分解能の劣化により、一層目及び二層目からの反射波が干渉して分離が困難になることがわかる。なお、25 mm 及び 31 mm の位置における PET 表面からの反射信号の周波数帯域幅 (理論上の距離分解能) は、それぞれ 0.356 THz (0.421 mm)、0.121 THz (1.240 mm) となり、距離分解能の著しい劣化が確認されている。図 1c に、同受信信号に対しレンズから PET 表面までの距離を 31 mm とした参照信号を用いた CS フィルタ出力を示す。同図から推定される PET の厚さは 0.4467 mm (相対誤差 10.7%) である。

## 謝辞

本研究は、JST、さきがけ、JPMJPR1771 の支援を受けたものである。

## 参考文献

- [1] M. Noto, F. Shang, S. Kidera and T. Kirimoto, *IEICE Trans. Commun.*, Vol. E101-B, No.6, pp. 1513-1520, Jun., 2018.
- [2] J. Dong, *IEEE Trans.*, Vol. 7, No.3, pp. 260-267, May, 2017.

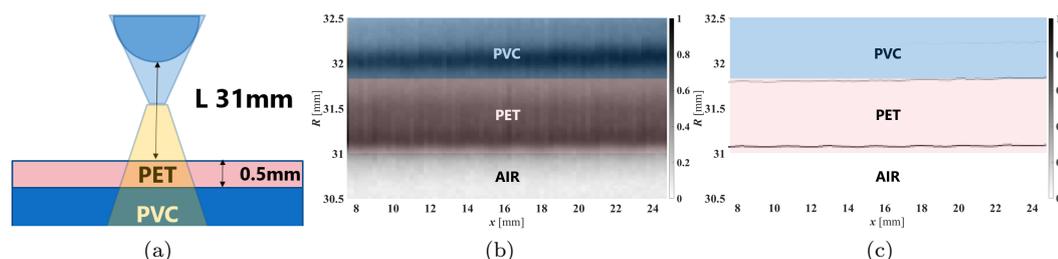


図 1: (a): THz-TDS 測定における観測モデル. (b): THz-TDS による観測信号. (c): CS フィルタ出力