

# Terahertz Hyperspectral Compressed Sensing Imaging

## 太赫茲高光譜壓縮感知影像

組別：B166 指導教授：楊尚樺 組員：106021131 黃昱心、108060034 閻帛佑

### Abstract

太赫茲波 (Terahertz) 技術在近年來受到許多的關注。它對生物化學分子的高辨識性以及非侵入性，在生醫領域上有極大的貢獻與應用。我們利用太赫茲時域光譜 (Terahertz Time Domain Spectroscopy, THz-TDS) 對未知的化合物進行量測，得以在不破壞量測物結構的前提下，得知此物質為何。我們也實作了頻譜分析的演算法，來計算量測物的折射率以及厚度。為了解決太赫茲時域光譜量測耗時過長的問題，我們參考了原先用於衛星影像計算的 All-Addition Hyperspectral Compressed Sensing Decoder (AAHCS) 這個演算法，利用量測時間較短的低解析高光譜影像和高解析低光譜影像，我們可以還原出高解析高光譜影像，以克服太赫茲時域光譜過於費時的問題。而因應 AAHCS 的數據需求，我們也利用 3D 列印機製作了低成本且高製作效率的太赫茲波段光束整形器，將原先太赫茲發射器的光斑形狀從圓形且能量高斯分布，轉變成正方形且能量均勻分布。

### Introduction

本專題基於太赫茲波的性質做相關的研究與探討。許多生物化學分子內部的交互作用振動所對應之吸收頻率都落在太赫茲波段，而對太赫茲波做量測也不會對量測物造成結構破壞，因此我們能利用太赫茲時域光譜 (Terahertz Time Domain Spectroscopy, THz-TDS) 對未知物質進行盲解。在解出未知物質的同時，我們還能利用 Fabry-Perot effect 對頻譜造成的變化，解出該物質的折射率以及量測物的厚度。且由於不同物質間的固態混合物頻譜與純物質呈現的頻譜呈線性關係，因此我們也能透過演算法，從混合物的頻譜中推算各項化合物的占比。

在我們能夠順利盲解出未知物質後，我們嘗試去解決太赫茲量測耗時過長的缺陷。本專題使用 All-Addition Hyperspectral Compressed Sensing Decoder (AAHCS) 這個演算法，利用量測低解析高光譜影像和高解析低光譜影像，我們可以在極短的量測時間內，得出高解析高光譜影像。而因應此演算法，我們也利用 3D 列印機，製作出專屬於太赫茲波段的光束整形器，將原先太赫茲發射器的光

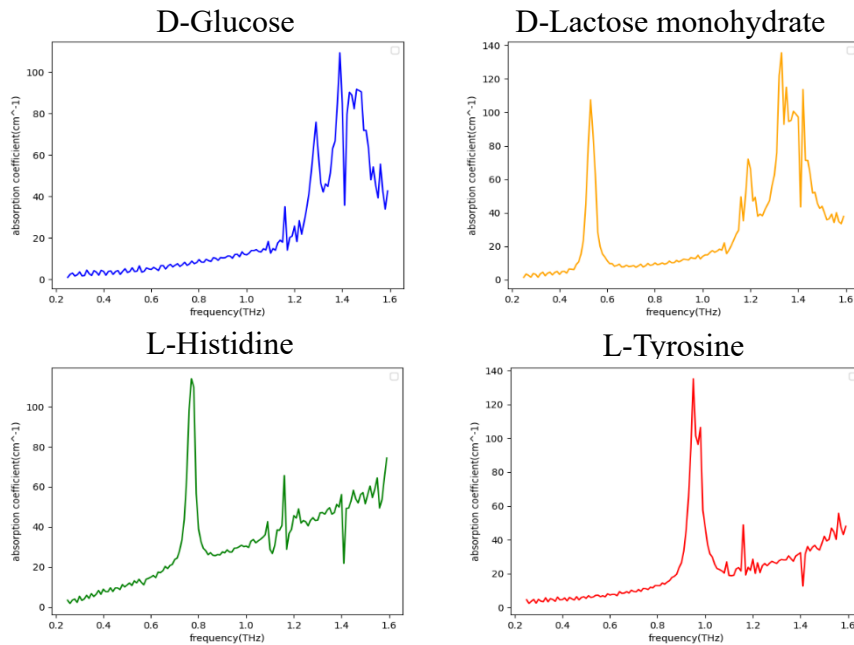
斑形狀從圓形且能量高斯分布，轉變成正方形且能量均勻分布，使得我們的量測結果更符合演算法的需求。

## 1. 太赫茲光譜的量測

利用多數的有機分子振動所對應之吸收頻率都落在太赫茲波段（0.1THz - 10THz）的特性，我們可以透過分析太赫茲波在通過不同介質後呈現的光譜來反推介值的性質。以乳糖（D-lactose）為例，在大約 0.5THz 的频段會有一個明顯的吸收峰，以及在 1.25~1.5THz 之間也有明顯的吸收頻率。在分析頻譜時，我們將量測物的頻譜與對照組（空氣）做比較，並定義吸收係數（absorption coefficient,  $\alpha$ ）為

$$\alpha = \frac{2}{d} \ln \frac{S_{sample}(f)}{S_{reference}(f)}$$

其中  $d$  為量測物的厚度， $S_{sample}(f)$  和  $S_{reference}(f)$  分別對應到量測物和對照組的頻譜。不同的物質會產生不同的吸收係數，利用此性質我們可以盲解出不同的有機化合物。



## 2. 樣品製備

在做太赫茲量測時，量測物的厚度、密度，會很大程度的影響量測品質，若是厚度太厚，太赫茲的能量衰減過快，頻寬便會減少許多，若是厚度太薄，樣品製備不易，且容易破碎、損毀。若是量測物的密度不夠緊實，顆粒與顆粒間的縫隙都會讓太赫茲波產生嚴重的繞射，因此，我們採用本實驗室的固態量測物製備標準流程。流程如下：

- i. 球磨：將氧化鋯（ZRO<sub>2</sub>）球和量測物 10 克加入球磨罐中，氧化鋯球的

量需占整個球磨罐的 30%。將球磨罐放到球磨機上至少 12 小時。

- ii. 壓錠：將球磨後的量測物，秤量 0.3 克，倒入壓錠模具中。利用手動壓錠機，拉動壓力桿使壓力增至 0.1 百帕，持續 15 秒後洩壓。取出圓錠便完成一次的製備。

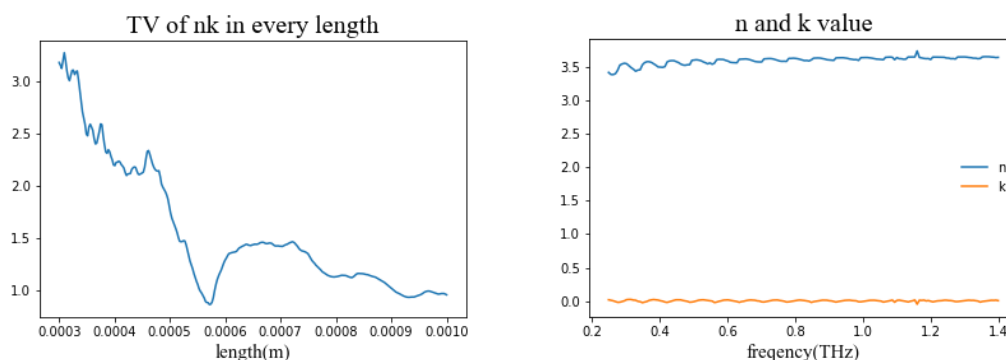
### 3. 找待測物的厚度與複折射率

用太赫茲波段垂直入射樣品，會有 Fabry-Perot 效應。依據此效應，由[1]可以

得到  $\hat{H}(\omega) = \frac{E_{complete}(\omega)}{E_{ref}(\omega)}$ ，其中  $E_{complete}(\omega)$  是主波與餘波在頻率空間上的總

和。用這個公式可以與量測的值相比，用梯度下降法方法使公式與量測的誤差變小，可以得出算出來的  $n(\omega)$  與  $\kappa(\omega)$  值，並猜測樣品厚度為  $n(\omega)$  與  $\kappa(\omega)$  值的總變差(TV)的最小值。

此結果為實測 GaAs 的結果，可以從圖中知道  $n(\omega)$  與  $\kappa(\omega)$  值的總變差(TV)的區域最小值出現在 0.0006 (m)附近，所以找到的厚度為：0.000575 (m)=575 ( $\mu\text{m}$ )。且在此厚度下的  $n(\omega)$  與  $\kappa(\omega)$  值為右圖。



### 4. 模擬樣品來找最適合 AAHCSD 演算法

因為這個演算法[2]原本是用於衛星影像上，搬到太赫茲波段來不知道能不能符合，所以要先模擬樣品待入演算法，調整樣品的樣子以及參數以達到最高準確度。

在模擬的過程中，我們調整了取樣率跟樣品的連續性。在取樣率的部分，我們將其設為 1% 的取樣率，在這個情況下，此演算法可以達到比別的演算法好的效果。在連續性的部分，我們使樣品有高度連續性，因此做了漸層數多寡來比較模擬結果。

圖 A

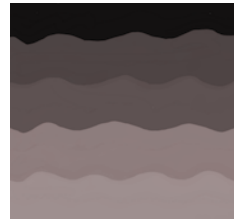
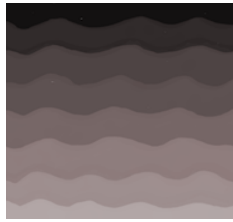
漸層數

8

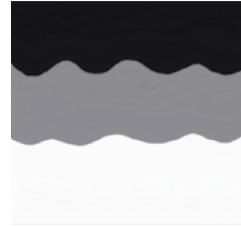
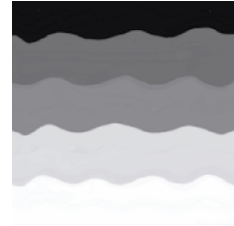
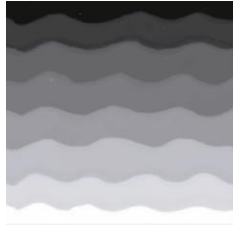
5

3

Picture



GT  
(False  
RGB)



reconstruct



圖 B

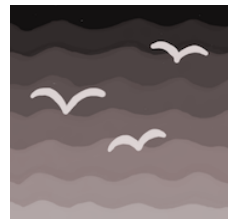
漸層數

8

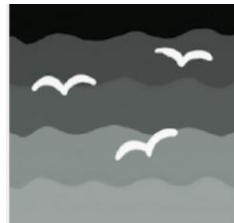
5

3

Picture



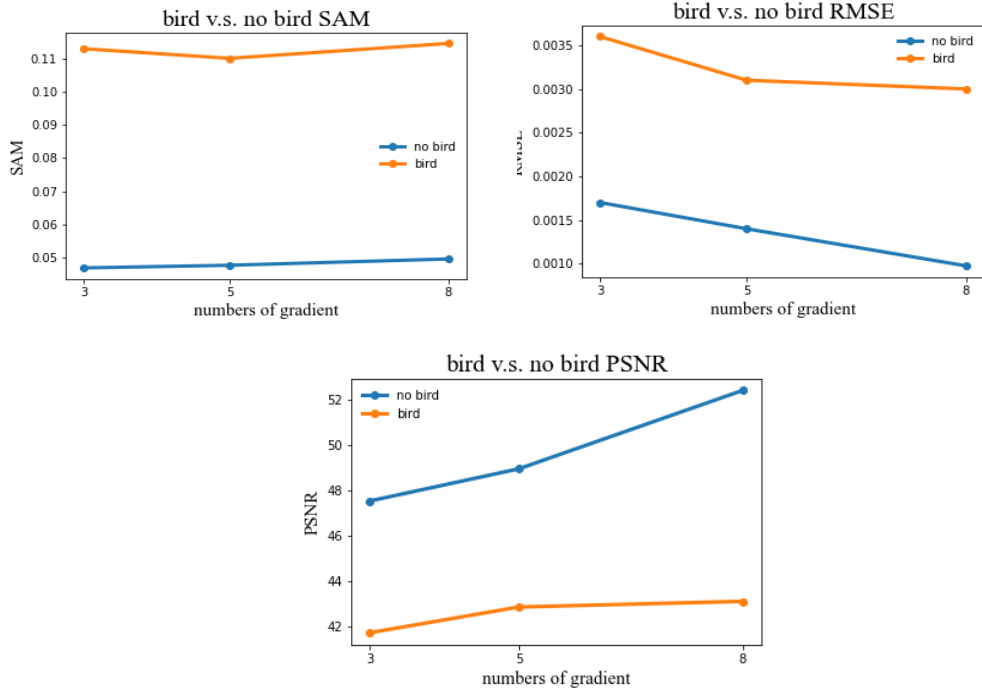
GT  
(False  
RGB)



reconstruct



圖 C



由這些結果可知，漸層數越多，也就是連續性越高，是的確可以造成重組的結果越佳。另外，有加上鳥的圖，也因為連續性變低而成效比沒有加上東西的差了一點。

## 5. 太赫茲光束整形器

由於 AAHCSO 演算法需求，我們需要使用光束整形器，把圓型高斯分布的光斑，變成方形且能量均勻分布。我們使用 Gerchberg-Saxton algorithm [3] (以下簡稱 GS-algorithm) 為基礎，並加以修改。我們可以給定像平面 (image plane) 和衍射平面 (diffraction plane) 的強度，利用兩者有著傅立葉轉換的關係，利用 GS-algorithm 算出這兩者的相位分布。具體做法如下：

- i. 給定像平面的強度  $u_0$ ，衍射平面的強度  $U_0$ ，並賦予像平面的初始相位為隨機相位  $\varphi$ ，而衍射平面的相位為  $\phi$ 。
- ii. 對像平面的訊號做傅立葉轉換，此時訊號移至衍射平面，將所得結果保留相位資訊，而強度代換成衍射平面的強度  $U_0$ 。
- iii. 將此訊號做逆傅立葉轉換，此時訊號移回像平面，將所得結果保留相位資訊，而強度代換成像平面的強度  $u_0$ 。

對步驟 2、3 做迭代， $\varphi$ 、 $\phi$  的值會愈趨準確。

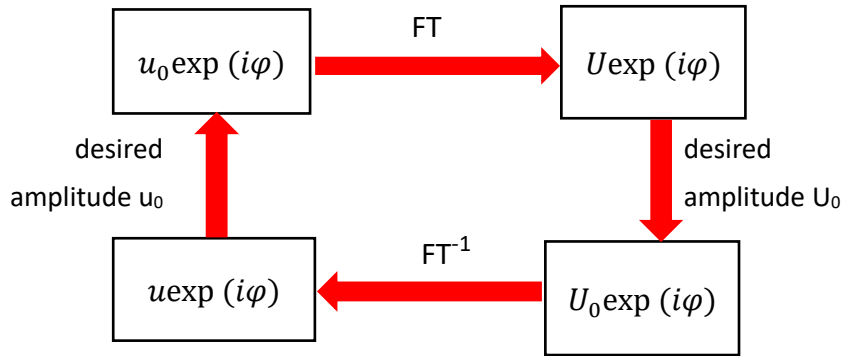


圖 2. Gerchberg-Saxton algorithm 架構

然而本實驗並非在遠場做量測而是近場，因此我們將 GS-algorithm 中的傅立葉轉換以惠更斯原理寫成的公式代換，即可計算近場的相位分布。

$$E_{(x,y)}^d(x',y') = \frac{A_{(x,y)}}{r_{(x,y),(x',y')}} e^{-i|k||r|_{(x,y),(x',y')}} + i\varphi_{(x,y)}$$

$$E_{(x',y')}^i = \sum_{(x,y)} E_{(x,y)}^d(x',y') [1 + \cos(\Omega)]$$

其中， $r$  為兩個平面上的點  $(x, y)$  和  $(x', y')$  所形成的向量， $k$  為波向量。 $\Omega$  為平面法向量和  $r$  所夾的夾角。

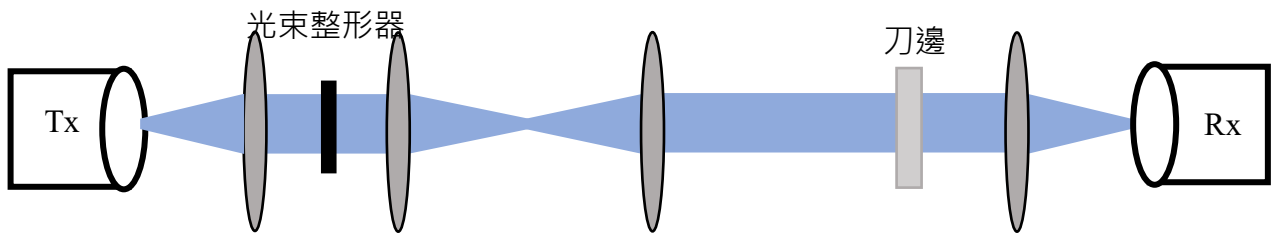


圖 3. 太赫茲光束整形器架構圖

如圖 4，我們選用高斯分布且直徑為 8 個單位的圓形光斑做為像平面的強度，以及均勻分布且長度為 10 個單位的正方形做為衍射平面的強度。可以對照發射器和模擬出來的輸出光斑取對數後的結果，雖然沒辦法完全變成正方形光斑，但是這樣的強度分布也比高斯分布均勻許多，而且把座標 0 到 5 和 15 到 20 的部分遮住的話，光斑形狀近似於正方形。

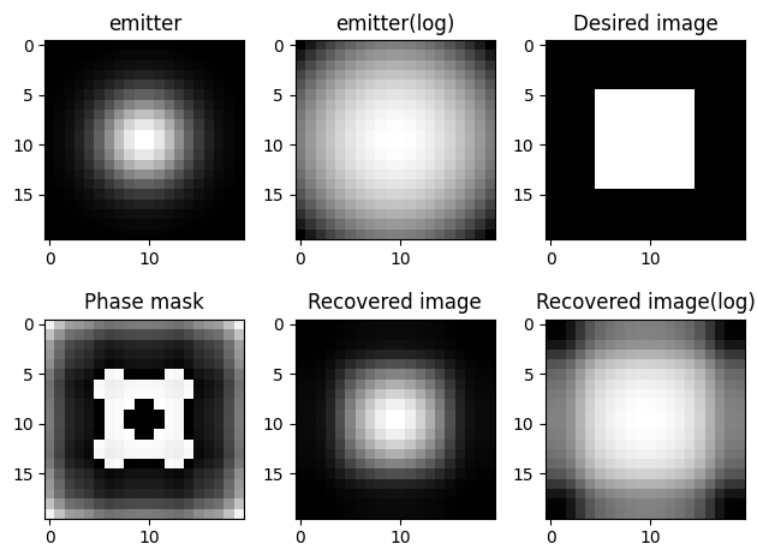


圖 4 光束整形器結構圖

圖 5 是我們量測的結果。我們選用的光束整形器材質是聚乳酸 (Polylactic Acid, PLA)，而目標波長  $\lambda_0 = 2.14mm(0.14THz)$ 。可以看到光束整形器的效果其實並不好。原因在於本系統能量最高的頻帶應在 0.3THz 的頻段，然而我們選用的目標波長並不在這附近，再加上材質選用上，聚乳酸對太赫茲波段的吸收效率極佳，導致大多數的能量都被吸收掉了，即使相位調變正確，能量分布也完全不一樣了。未來改良後我們應製造出目標波長為 0.3THz 的光束整形器，而選用材質部分，我們應選用對太赫茲波段吸收率較低的材質如聚丙烯 (PP)、耐衝擊聚苯乙烯 (HIPS)，來減小誤差。

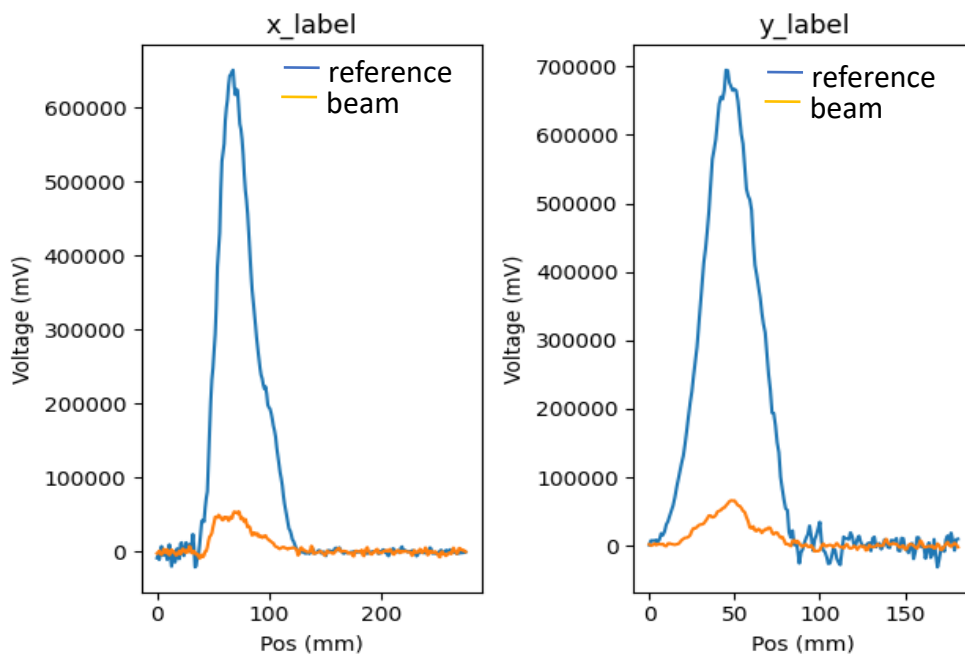


圖 5 實際量測結果

## 心得感想

昱心：

當初因為楊尚樺教授吸引人的介紹，原本想要做通訊領域相關的我，跨出了舒適圈來到了這個專題，光電領域算是我沒有很擅長的領域。幸好進來實驗室之後，有專門的學長帶我、讓我無時無刻問問題，使我漸漸不再覺得這個領域遙不可及。出身於數學系，我偏好可以做跟數學相關的研究專題，因此我在這個專題中的角色多著重在演算法，組員則專精在實驗上的事物。剛開始，我對於要讀很多文獻感到痛苦，因為在做演算法方面，所以閱讀的文獻多牽涉數學，但文獻跟課本不一樣的地方就是文獻寫的太精簡，有些知識文獻都當作已知，故在初期閱讀的過程中，為了搞懂其中的一段，我就要去翻很多之前的參考文獻來理解，常常一篇都要讀兩三週。不過在經過半學期的磨練之後，我已經不害怕讀文獻了，甚至在跟成大實驗室開啟計畫的初期，我可以有條理的跟對方解釋我們實驗室在做的事情，讓我很有成就感。在做專題的這一年，遇到了不少挫折，尤其是演算法實作不出來進度大delay的時候特別陰鬱，可能做研究就是這樣吧！但是楊老師常常鼓勵我們，他總是對各種事情抱有樂觀的態度，漸漸地也覺得好像事情也沒這麼困難，讓我們更有信心可以把問題解決。雖然，最後沒有辦法在兩個學期中把該有的成果呈現出來，但是我們依然會持續努力，把目標放在未來期望中，因為如果把做出來這個專題會是一個很大的突破！很遺憾的是我的組員因為是電資專題無法跟我一起參賽，但我仍會帶著他的名字放在這個計畫中，因為他做的東西值得被展示與留存！

帛佑：

一年前，我在專題說明會上聽到楊老師說明太赫茲黑科技，馬上被這個新穎的技術給打動，因此我踏入 YRG 一起跟實驗室的學長姐們研究、奮鬥。很感謝實驗室的每個成員，我從他們身上學到太多太多東西了，從最基礎的太赫茲常識、如何做 paper survey、太赫茲量測、用 Python 操控儀器、3D 列印技術等等...，這一年真的收穫太多太多。我也很感謝我的隊友昱心，在我實驗做不出來的時候會鼓勵我，也很樂於跟我分享與討論實驗結果，合作十分愉快。最後我最感謝楊老師，他提供給我們許多學術上的意見，也在我遇到瓶頸時鼓勵我繼續向前，才能讓我做出如金的成果。希望這個研究計畫能繼續發展，未來有機會登上國際期刊。

## 參考文獻

- [1] “Material parameter estimation with terahertz time-domain spectroscopy,” Timothy D. Dorney, Richard G. Baraniuk, and Daniel M. Mittleman(2001)
- [2] “All-Addition Hyperspectral Compressed Sensing for Metasurface-Driven Miniaturized Satellite,” Chia Hsiang Lin, Tzu Hsuan Lin (2021)

[3] J. Gospodaric, A. Kuzmenko, Anna Pimenov, C. Huber, D. Suess, S. Rotter, and A. Pimenov, "3D-printed phase waveplates for THz beam shaping," *Applied Physics Letters*, Vol. 112, Issue 22, pp.3-6, 2018.