

國立清華大學 電機工程學系

實作專題研究成果摘要

Fundamental Experiments and Analysis
of Randomly Modulated LiDAR

隨機調變光達基礎實驗及分析

專題領域：光電領域

組 別：B589

指導教授：林凡異

組員姓名：鄭宇桓、應心華

研究期間：113年 7月 1日至114年11月24日止，共13個月

摘要

本專題探討隨機調變光達系統，並透過基礎實驗進行性能分析。傳統光達在多目標或強干擾環境中容易產生量測誤差，難以有效分辨不同反射源。為改善此問題，我們採用混沌調變雷射作為光達訊號來源，其寬頻與類噪聲特性提升解析度並降低外部干擾影響。

實驗內容包括白板目標的距離量測、精確度分析、SNR 評估，以及透過調整透鏡組與 APD 間距離所造成的離焦測試；此外，我們也以 100×100 像素掃描一具約 2 公尺外的犬型模型，重建其三維點雲與對應 SNR 分布。結果顯示，離焦會使中央像素 SNR 降低並使高 SNR 區域變寬，反映出光學對準對系統性能的影響；同時，混沌調變光達亦成功支援中距離三維成像。

本研究展示混沌調變光達在抗干擾量測上的潛力，並指出其運作模式與自由空間光通訊相近，未來可望結合自駕車之測距與車對車光通訊，發展整合型自動載具感測與通訊系統。

Abstract

This project investigates a randomly modulated (chaotic) LiDAR system and evaluates its performance through fundamental experiments and analysis. Traditional LiDAR often encounters measurement errors in multi-target or interference-intensive environments, making it difficult to separate different reflection sources. To address this limitation, we adopt a chaotic-modulated laser source, whose broadband and noise-like characteristics enhance resolution and suppress external interference.

Our experiments include distance measurement, precision evaluation, SNR analysis, and a defocus test on a whiteboard target, followed by a 100×100 -pixel 3D scan of a dog-shaped object. The results show that defocus degrades the central-pixel SNR and broadens the high-SNR region, revealing how optical alignment impacts system performance. The generated point-cloud maps demonstrate that chaotic modulation can successfully support mid-range 3D imaging.

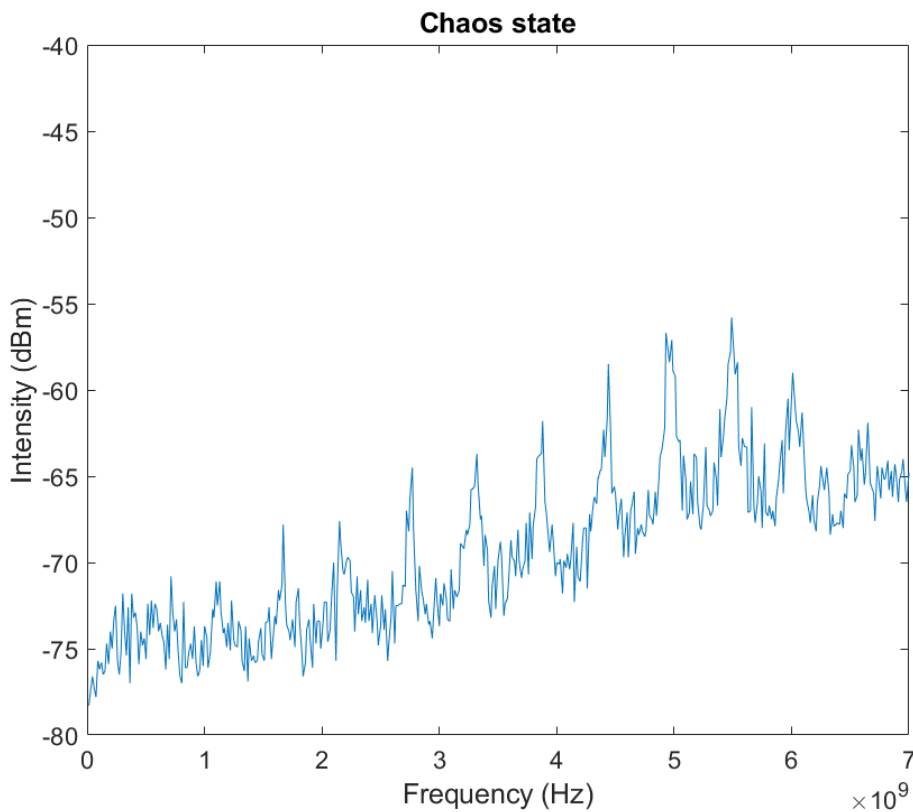
This study highlights the potential of chaotic-modulated LiDAR as a more interference-resilient sensing technique and suggests its conceptual connection to free-space optical communication systems, pointing toward future integration of LiDAR-based ranging and vehicle-to-vehicle optical communication.

一、研究動機

作為新興技術，光達目前正處於蓬勃發展的狀態。而其中應用也非常廣泛，除了地形掃描以外，也有應用在自駕車上。光達的特色在於高解析度以及高速掃描，然而在現實層面上，運用時常常受到外在的干擾源影響。傳統光達在多目標場景或強干擾環境下，常出現量測誤差，甚至難以準確區分不同反射源。因此我們研究的主題是混沌調變光達，將抗干擾能力提升。混沌訊號的寬頻特性使得量測解析度得以提升，同時其似隨機特質亦能降低外部干擾影響。我們希望能夠透過此專題研究，改善光達現今面臨的挑戰與困境。

二、研究背景

若在雷射光源的外部利用分光或反光的方式將輸出的光打回雷射共振腔內形成光回饋(optical feedback)，則回饋光會和腔內的光場、載子作用，產生不同的雷射輸出動態行為。當改變回饋光的強度或透過改變回饋光路來改變光回饋進入雷射光源的延遲時間，雷射就會輸出不同的動態行為，共有三種不同的動態行為：Period-one (P1) state、Quasi-period (QP) state 以及 Chaotic oscillation (CO) state。

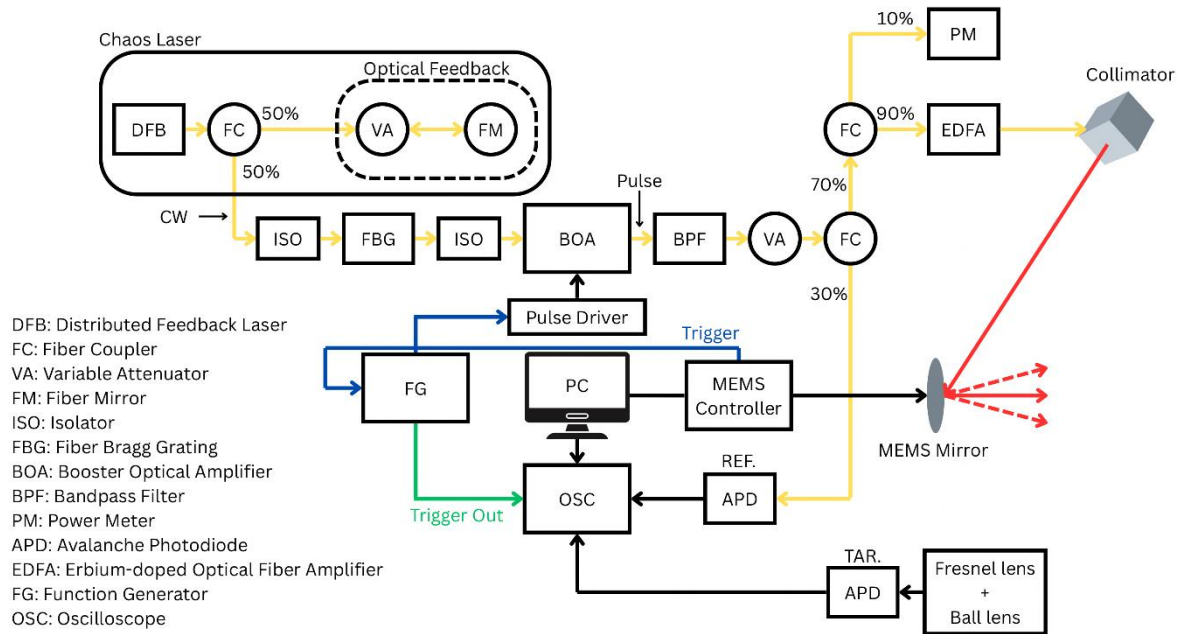


↑ 圖（一） Chaotic oscillation state 頻譜

圖（一）為 Chaotic oscillation (CO) state 的頻譜，我們能在其中看到多個峰值頻率。但每個峰值都不高(約在 -55dB 到-70dB 左右)，且線寬也較寬。本研究正是選用處於 CO state 的雷射作為光源的混沌光達系統。

三、研究方法

實驗架構：



↑ 圖 (二) 實驗架構

實驗目標：

在第一個實驗中，我們的目標物是一塊白板。我們除了量測最基礎的單點距離、精確度 (precision) 以及訊號雜訊比 (SNR)。我們也透過改變透鏡組和 Avalanche Photodiode 之間的距離以造成離焦，並以 60 個像素點對白板進行水平掃描，藉此評估其對量測結果的影響。

在第二個實驗中，我們掃描了一隻距離系統約 2 公尺的犬型模型，掃描解析度為 100×100 像素。掃描數據被建構成兩張三維點雲圖，分別用色階呈現各點的距離與 SNR。

實驗流程：

系統開啟後，Chaos Laser 模塊會不斷產生混沌訊號，而我們會用電腦連接 MEMS Controller 控制掃描的朝向。根據掃描的頻率，MEMS Controller 會再控制 Function Generator 產生訊號，分別讓 Pulse Driver 開始產生脈衝訊號和讓 Oscilloscope 開始記錄接收到的訊號。由 Chaos Laser 模塊產生的混沌訊號會透過 Booster Optical Amplifier 和 Pulse Driver 產生的訊號從 CW 訊號調變成 PW 訊號，並在經過 Bandpass Filter 濾波後經過兩個 Fiber Coupler 分成三道光：一道射入 Power Meter

中，用來測定光強度；一道直接經由光纖進入 Avalanche Photodiode，在 Oscilloscope 記錄為 reference 訊號；最後一道則會先經過 Collimator 並經過 MEMS Mirror 射向指定的目標位置，在目標處反射，最後進入 Fresnel Lens 和 Ball Lens 並由 Avalanche Photodiode 轉換成電訊號後由 Oscilloscope 記錄為 target 訊號。

接著便是對經過 Bandpass Filter 處理後的 reference 和 target 訊號做 cross correlation 來計算目標物和光達系統間的距離。根據 cross correlation 的特性，cross correlation 訊號的最大值即代表 reference 和 target 訊號之間的延遲。以此為基礎，我們便能計算出目標物與光達系統間的距離。

在正式測量之前，我們需要先校正光達系統的輸出光束，確保光束的準直。首先，將一塊白板置於系統前方的近處，並標記雷射光斑的位置。接著，將白板往後移動到遠處，再次確認雷射光斑的位置。若光斑位置發生偏移，表示目前發出的雷射光束並沒有準直。這時候需要調整準直器內的透鏡，改變光束的發射角度。接著再次將白板移動到系統前重複測試。若光斑的位置能夠和先前的標記重合，則代表目前發出的雷射光束已經準直，可以進行實驗。

四、研究結果

實驗一：

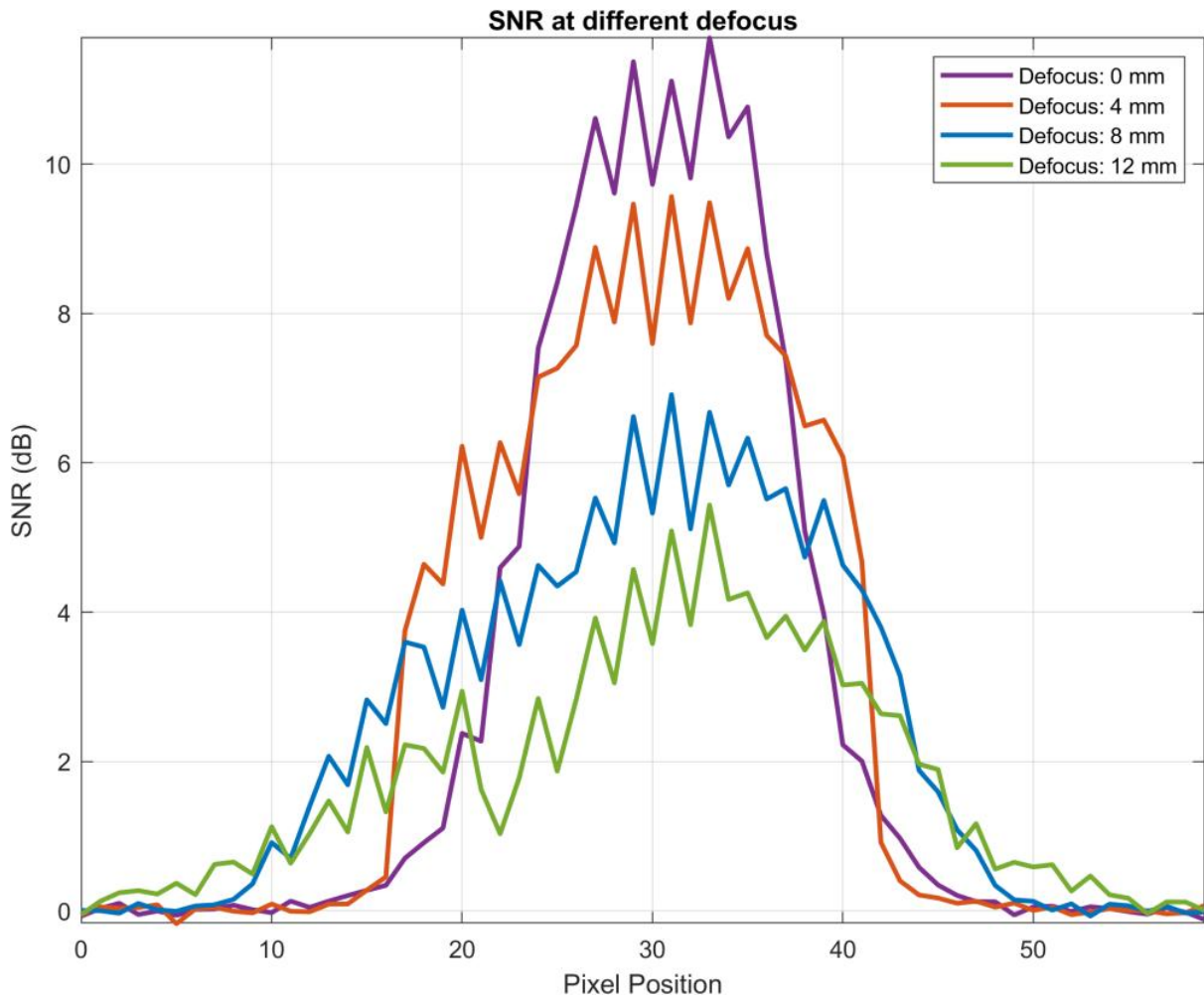
表（一）展示了當白板和系統間距離為 1 m 到 4 m 時的測量結果，除了在距離 2 m 時誤差略高（可能來源於架設誤差或環境干擾）外，其餘的測量誤差皆在 1% 以下，這顯示了光達系統的高準確度。

此外，測量的 Precision 皆在 2.4 mm 到 2.8 mm 之間，這說明了每一幀之間的測量結果都具備高度一致性，並不存在特別不穩定的極值。而 SNR 的遞減趨勢也符合光強度隨著距離而遞減的特性，且實驗中的最遠距離 4 m 仍然處在此混沌光達系統的有效範圍之內，證實了其中短距離內的測距能力。

Actual distance	Measured distance	Error	Precision	SNR
1(m)	1.00900(m)	0.90%	2.52155(mm)	12.75511(dB)
2(m)	2.14643(m)	7.32%	2.47802(mm)	13.21967(dB)
3(m)	2.98111(m)	0.63%	2.72193(mm)	10.95993(dB)
4(m)	3.96876(m)	0.78%	2.47902(mm)	10.52077(dB)

↑ 表（一）不同距離下的光達測距

圖（二）展示了在不同離焦（Defocus）下，SNR 在空間中的分布。隨著離焦的增加，我們能觀察到 SNR 的分佈曲線明顯的向兩邊擴張。這證實了系統的 FOV 正隨著離焦而增加，使系統能接收到來自更廣角度的訊號。但同時，位於中間的 SNR 峰值也隨著離焦的增加而降低。這說明了 FOV 的增加並不是源於訊號總量的增加，而是原本集中於中央的能量，隨著離焦而被分散到兩側。由於峰值 SNR 的降低，該區測量結果的不確定性和誤差可能會因此增加。綜上所述，調整離焦的參數提供了在測量精準度和 FOV 之間進行取捨的手段。



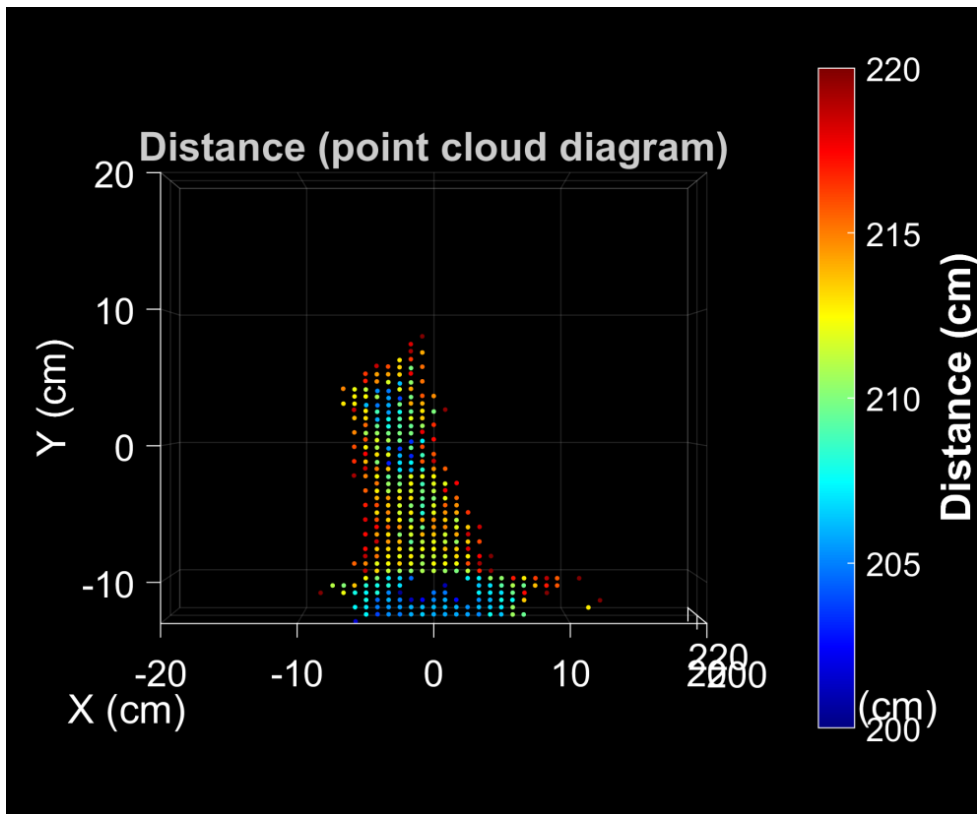
↑圖（二）不同離焦下的 SNR 分布

實驗二：

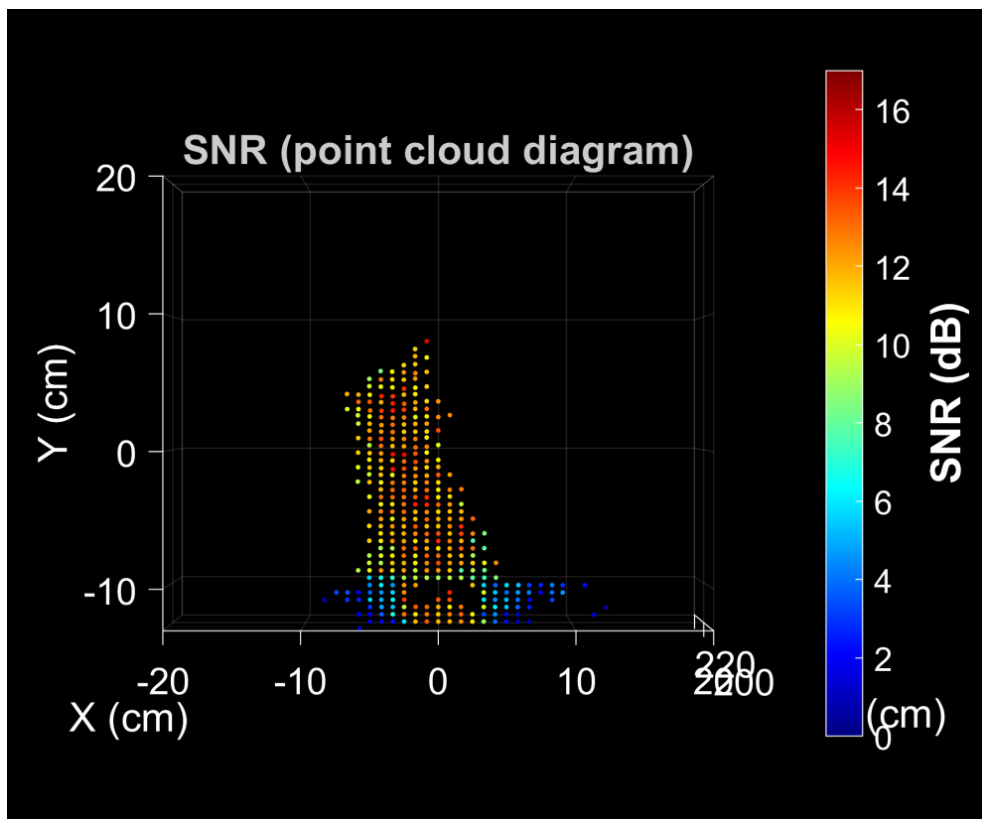
由於光達系統的掃描結果也會包含除了目標模型外的背景區域，因此為了能夠將模型的成像從背景中提取出來，我們將距離大於一定值的點濾除。根據實際的數據分布判斷，我們決定將距離大於 220 cm 的點視為背景並濾除。

圖（三）與圖（四）是將距離大於 220 cm 的點濾除後的距離、SNR 點雲圖。由於已經將背景訊號移除，因此可以大致辨識出模型的輪廓，但模型邊緣的細節卻無法清楚的呈現。

造成這種現象的原因，推測是由於我們測量距離其實是光路從發射點經過目標點再到偵測器的長度，而非目標點的垂直縱深距離。當目標點是模型邊緣時，光路長度可能和目標點是背景板的中心區域相近，這導致用距離作為條件進行背景濾除時模型邊緣也被一併濾除，使得模型邊緣的細節卻無法清楚呈現。



↑圖（三）犬型模型掃描點雲圖（色階表示距離）



↑圖（四）犬型模型掃描點雲圖（色階表示 SNR）

五、結論

在本研究中，我們驗證了混沌光達系統在中近距離內的測距能力，以及針對周遭環境的掃描能力，但如何將系統測量的光路距離校正為實際的縱深距離仍是一大挑戰。未來我們可以導入更完善的資料處理方式，藉由分析測量距離與縱深距離的關係並校正測量距離，以此獲得更精確的點雲成像。

光達本身運作的模式與光無線通訊有著相似之處：發射端將訊號調變後經由自由空間傳輸，經過通道雜訊與反射後抵達接收端，再透過解調與訊號處理重建有用資訊。從這個角度來看，光達可以被視為一種自由空間通道下的特殊通訊系統，其挑戰正對應於通訊領域中的「雜訊干擾與多徑傳輸」。或許將自駕車的測距(光達)與車對車通訊(光無線通訊)結合，建構出自動載具通訊網路系統。

六、參考資料

- J. D. Chen, H. L. Ho, H. L. Tsay, Y. L. Lee, C. A. Yang, K. W. Wu, J. L. Sun, D. J. Tsai, and F. Y. Lin, “3D chaos lidar system with a pulsed master oscillator power amplifier scheme,” *Opt. Express*, vol. 29, no. 17, pp. 27871-27881, Aug. 2021.
- H. L. Ho, J. D. Chen, C. A. Yang, C. C. Liu, C. T. Lee, Y. H. Lai, and F. Y. Lin, “High-speed 3D imaging using a chaos lidar system,” *Eur. Phys. J. Spec. Top.*, vol. 231, pp. 435-441, Jan. 2022.
- “Experiments on Nonlinear Dynamics of a Semiconductor Laser Subject to Optical Feedback,” Laser Dynamic Lab, Institute of Photonics Technologies, National Tsing Hua University.

本報告使用生成式 AI 工具協助潤飾。

七、心得

鄭宇桓：

這一年的專題實作，我們從一開始的閱讀論文到最後進行實驗都是由林凡異教授與陳鈺承學長所帶領的，非常感謝他們的教導與建議。最一開始我對光達領域的知識有限，僅止於知道一些基本應用以及與雷達的不同之處，對於運作原理、訊號處理可以說是一竅不通。正是透過閱讀這幾篇論文我才能對光達有了進一步的了解，並且接觸到了隨機調變混沌訊號這個核心理論。

我們最初接觸到實驗儀器大約是在九月份的時候，那時因為沒有操作雷射等相關儀器的經驗，所以是由學長親自操作示範給我們看的。而隨著實驗次數的增多，我們也逐漸熟悉了操作儀器的方法。從器材的開關順序到參數的設定，掃描的進行、數據的紀錄，都已經可以自行完成。

後續我們進行實驗數據的處理，使用 Python 與 matlab 兩種語言。由於學長為了訓練我們的能力，因此要求我和心華各自繳交一份程式。但是我在過程中因為寫出來的程式無法順利與原程式相容，導致一直報錯而無法運行。最後是心華幫我檢查程式，並且

提示我該如何修改原程式，進而讓我在最後關頭完成了報告。

經過了這一年的訓練，不論是知識層面還是實作層面都有了進步，在研究以及團隊合作上更是有深刻的體悟。對光達系統與混沌調變訊號有了更專業的認識；在儀器的操作上、程式的撰寫上、數據的處理上，也有學習到了許多。再次感謝指導我們的林凡異教授，帶領我們的陳鈺承學長，以及和我一起進行專題研究的心華，多虧有你們，我們才能順利的完成這份研究與報告。

應心華：

在系上舉辦的專題說明會上，LDL展示了光達在環境感測上的可能性——能夠精確地對區域地形進行掃描並建模。這種快速獲取三維空間資訊的技術，讓我看到了光達應用於地理探勘的巨大價值。因此我毅然選擇了混沌光達系統作為研究主題。

在專題研究的過程中，我們從最基礎的外部光回饋和雷射非線性動態的關係出發，一路延伸至混沌光達的測距應用，最終成功實現了遠距物體的掃描與建模。在這之中，最令我印象深刻的就是觀察雷射非線性動態的實驗。因為必須透過精密微調光衰減器來控制外部回饋光的強度，我們花了不少精力反覆調整，才終於捕捉到各種雷射非線性動態的頻譜變化。

從專題開始至今，我最大的收穫不僅是光學知識，更是學會了如何用程式語言來分析實驗數據。看見學長如何運用迴圈、判斷式這些基礎指令，將雜亂的原始數據瞬間轉化為有意義的圖表時，我深受震撼。這份經歷不僅改變了我對程式應用的認知，更讓我獲得了結合物理與程式設計的跨域能力，為未來深入研究奠定堅實基礎。