

國立交通大學

運輸科技與管理學系

碩 士 論 文

在 FMCW 雷達偵測器架構下
以端點檢測法判別車輛之有無

Vehicle Detection Using Endpoint Detection
Method for FMCW Radar Detector

研 究 生：姚志霖

指 導 教 授：卓訓榮 教授

中 華 民 國 九 十 九 年 八 月

在 FMCW 雷達偵測器架構下_以端點檢測法判別車輛之有無

Vehicle Detection Using Endpoint Detection
Method for FMCW Radar Detector

研究生：姚志霖

Student：Chih-Lin Yao

指導教授：卓訓榮

Advisor：Hsun-Jung Cho

國立交通大學

運輸科技與管理學系



Submitted to Department of Transportation Technology and Management

College of Management

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

in

Transportation Technology and Management

August 2010

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十九年八月

在 FMCW 雷達偵測器架構下_以端點檢測法判別車輛之有無

學生：姚志霖

指導教授：卓訓榮 博士

國立交通大學運輸科技與管理學系碩士班

摘 要

進行交通管制與管理策略的過程為利用即時的流量、車速等交通資訊來掌握道路使用狀況，使交通管理人員能針對交通情形來進行管制或策略規劃。為了獲得即時的交通資訊需要透過車輛偵測器進行道路監測，由偵測器所蒐集到的資訊，透過交通參數演算法轉換成有意義的交通資訊。

本研究以 FMCW 雷達偵測器得到的訊號作為研究資料來源，探討在車輛通過雷達偵測範圍時，如何把車輛對應之訊號予以偵測出來。在系統能準確判斷有無車後，才能針對後續交通參數(車速、道路擁擠度等)進行開發，因此車輛偵測在交通資訊中為一個重要的參數。

研究方法上，利用車輛的雷達回波特性和雜訊不同，來找出車輛通過的訊號特徵。以往研究對於車輛偵測方法大多以車輛反射的訊號能量來設定門檻，本研究在車輛偵測方法上採用以譜熵計算訊號能量，決定門檻設定與更新機制，並透過端點檢測法來進行車輛訊號偵測。

為了探討在不同信噪度下，偵測方法的準確度，加入了訊號模擬模式，以本研究方法與能量門檻法分別針對不同的信噪度進行辨識率測試。最後利用雷達偵測器實際蒐集的資料進行研究，驗證本研究方法是否有更好的車輛偵測結果。而根據模擬訊號實驗與雷達訊號分析的結果，本研究提出的譜熵門檻法，其車輛訊號辨識率皆比傳統能量門檻法好。

關鍵詞：車輛偵測、FMCW 雷達偵測器、端點檢測法、譜熵

Vehicle Detection Using Endpoint Detection

Method for FMCW Radar Detector

student : Chih-Lin Yao

Advisors : Dr.Hsun-Jung Cho

Department of Transportation Technology Management
National Chiao Tung University

ABSTRACT

Real-time traffic information such as traffic flow, vehicles speed ,and etc. are being used in traffic control and management. It helps the traffic manager to implement the traffic control or strategy planning for traffic conditions. Using vehicle detectors to keep road under surveillance is necessary for real-time traffic information. Applying traffic parameter algorithm to convert the collected data by vehicle detectors into traffic information.

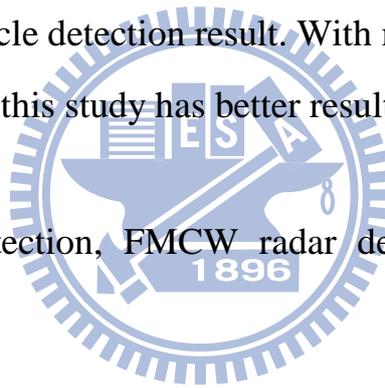
As vehicles signal can be detected, we can derive other traffic parameters such as vehicle speed, vehicle density per lane etc.. Therefore, vehicle detection is an important factor in traffic information. This study deals with signal features derived from FMCW radar detector and design an algorithm to distinguish the vehicles signal when vehicles pass through the radar detection range. Using the difference between vehicle signal and background noise to derive signal feature when vehicles pass through.

The traditional vehicle detection methods are based on calculating the energy of vehicle signal and setting a threshold to distinguish target signal.

The detection accuracy of these methods gets worse when SNR of signal become low. Therefore, this investigation proposed an spectral entropy method to calculate the signal energy, and designed a vehicle signal detection mechanism which combined spectral entropy threshold and endpoint detection method.

The accuracy of detection method varies in different situations. Hence this study simulates radar signals with different SNR conditions. And discusses the difference of accuracy between proposed method and the energy threshold method. Finally, the study took the real data which collected by the FMCW radar detector to carry out numerical analysis. Figure out if the method got a better vehicle detection result. With numerical analysis result, the method proposed by this study has better result on signal detection.

Keywords: vehicle detection, FMCW radar detector, endpoint detection, spectral entropy.



誌謝

首先，我要感謝這兩年給予我指導的卓訓榮老師，感謝老師在我兩年的研究生生涯中，不辭辛勞的諄諄教誨與指，讓我瞭解研究生所需具備的學習態度與能力；透過計畫案的參與，學習到許多做人處事的道理以及和他人共同處事的方法。感謝資財系的周幼珍老師，在我研究的路上，幫我點出一些我不清楚或沒想到的觀點，使我可以對於研究內容可以更為瞭解，想的更為完善。

接下來，我要感謝健綸學長與清大統計所的艾雪芳學姐，在我進行實驗的過程中，提供我意見並協助我演算法程式的建立，對於我進行研究所需要的訊號處理觀念，給於很多的指導與建議，另外，也感謝黃恆學長與昱光學長對於我的問題，提供他們的經驗與看法，解決不少我遭遇到的困難，使我的研究可以繼續走下去。

謝謝許多好友在我兩年的研究生生活中陪我度過，不論在生活休閒娛樂、課業與精神方面，都給予我很大的幫助與鼓勵，感謝如君學姐、亦晴學姐、老總、Issac 等，他們教我如何適應研究生生活並帶給我許多的溫暖，因為他們使我更能融入交大這個環境。另外，感謝跟我一起奮鬥的怡婷，在這兩年的學習過程中一起成長、進步，在每次熬夜的努力中，彼此加油打氣，繼續在研究生的道路走下去。還有許多不勝列舉的朋友們，因為有了你們的幫忙與陪伴，使我具有無比耐心與毅力來完成研究。

最後，感謝我的父母，在我的求學生涯中，給予我無限的支持與鼓勵，使我在求學上能無後顧之憂的努力下去，還有我的好友們，因為你們的陪伴使我可以繼續地在這條路上堅持走下去，不論你們在彰化、新竹、台北、台南或哪裡，謝謝你們，在此以此篇論文獻給在我身邊的妳們。

志霖 謹誌

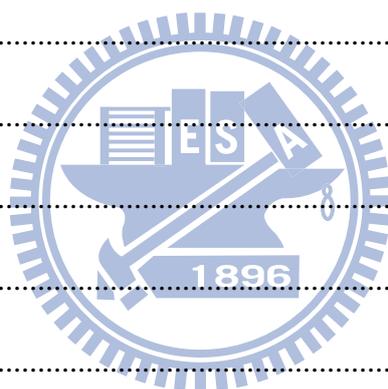
國立交通大學運管所

中華民國九十九年八月

目錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	ii
誌謝.....	iv
目錄.....	v
圖目錄.....	vii
表目錄.....	ix
第一章 緒論.....	1
1.1 研究背景與動機.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 研究範圍.....	3
1.4 研究內容.....	4
第二章 文獻回顧.....	6
2.1 微波雷達偵測演算法相關文獻.....	6
2.2 端點檢測法相關文獻.....	9
2.3 資訊熵相關文獻.....	15
2.3.1 分帶譜熵 (Band-Partitioning Spectral Entropy, BSE).....	16
2.3.2 適應分帶譜熵(Adaptive Band-Partitioning Spectral Entropy, ABSE).....	18
2.4 小結.....	19
第三章 雷達偵測器.....	20
3.1 雷達偵測器簡介.....	20
3.2 雷達偵測器硬體架構.....	20

3.3 雷達偵測器偵測原理	21
第四章 端點檢測譜熵分析模式	25
4.1 端點檢測簡介	25
4.2 端點檢測法參數設定	26
4.3 門檻設定與更新機制	28
4.4 車輛訊號的端點檢測模式	32
4.5 車輛訊號處理	34
第五章 模式驗證	38
5.1 雷達訊號模擬	38
5.2 模擬結果	41
5.3 實例分析	43
5.3.1 偵測環境介紹	43
5.3.2 偵測器軟體	44
5.4 實例分析結果	46
第六章 結論與建議	50
6.1 結論	50
6.2 建議	50
參考文獻	52



圖目錄

圖 1.1 雷達偵測多車道環境示意圖	3
圖 1.1 研究流程圖	5
圖 2.1 模糊陰影理論之雷達偵測示意圖	7
圖 2.2 RTMS 系統的反射訊號示意圖	9
圖 2.3 語音訊號圖	10
圖 2.4 雷達訊號圖	10
圖 2.5 (A)端點檢測的狀態模式圖	11
(B)時間 I 下的狀態轉換圖	11
圖 2.6 越零率參數例圖	12
圖 2.9 (A)語音訊號片段中，各點的尤拉距離-對數能量分布圖	14
(B)非語音訊號片段中，各點的尤拉距離-對數能量分布圖	14
圖 3.1 雷達偵測器硬體架構	21
圖 3.2 雷達波運動示意圖	21
圖 3.3 發射波與接收波波型圖	22
圖 3.4 電壓-時間波波型圖	23
圖 3.5 接收合成波的取樣示意圖	24
圖 3.6 接收雷達波之頻譜圖	24
圖 4.1 隱藏馬可夫模型示意圖	25
圖 4.2 (A)矩形窗 (B)傅立葉轉換之矩形窗	26
圖 4.3 (A)漢明窗 (B)傅立葉轉換之漢明窗	27
圖 4.4 (A)車輛通過之訊號偵測圖	32
圖 4.4 (B)車輛通過之訊號偵測放大圖	32
圖 4.5 端點檢測之訊號狀態圖	33
圖 4.6 雷達訊號資料型態圖	36
圖 4.7 車輛訊號辨識流程	37
圖 5.1 模擬訊號示意圖	38
圖 5.2 模擬訊號波型圖(25DB)	41
圖 5.3 不同信噪度下的波形圖	42
圖 5.4 雷達偵測環境圖(公道五路)	43
圖 5.5 車輛偵測影像畫面(公道五路)	44
圖 5.6 使用 DAQ 卡進行資料擷取	44

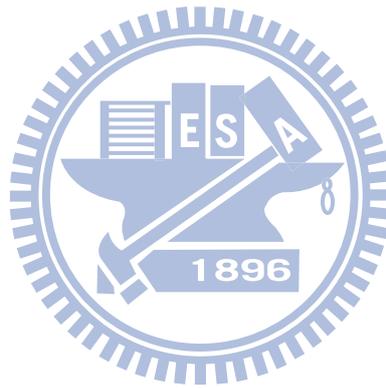
圖 5.7 LABVIEW 軟體介面..... 45

圖 5.8 偵測環境示意圖 46



表目錄

表 5.1 各信噪度下之訊號辨識成功率	42
表 5.2 雷達偵測器之參數與特性	45
表 5.3 車道對應之頻率	47
表 5.4 各車道之車輛數判斷成功準確率	48



第一章 緒論

1.1 研究背景與動機

根據交通部之 97 年重要交通統計[29]，其汽車客運達 105,386 萬人次(市區及公路客運分占 76.6%及 23.4%)占陸上大眾運輸 60.5% ，機動車輛數達 2,109 萬輛(汽車達 673 萬輛、機車數達 1,437 萬輛)，顯示國人現階段仍以汽機車與客運為主要交通運輸工具，由此衍生出相關的交通擁塞問題。為了改善現有交通狀況，在觀念與作法上已逐漸由擴增道路容量的方式轉為提升現有的交通資源與設施的使用效率，在既有的資源下，達到最大的使用效率。

有鑑於此，各國著手研發各種交通管理與控制策略，以提升交通運輸的整體效率。在交通控制系統中，交通資訊為重要構成要素之一，需透過偵測器來獲取實際道路路況資料。隨著信息技術的研發，各式各樣的偵測器被開發出來，一般可分為兩種：侵入式與非侵入式[12][30]。侵入式偵測器主要將感應器與資料紀錄設備架設於道路上，在架設與後續維護上常需要破壞鋪面、影響交通，其類型主要包含如下：

- 壓力管式(Pneumatic road tubes)：將橡膠管置放於道路車道上，透過車輛壓過管子所造成之管內氣壓變化來計算其通過車輛數，其缺點為受限溫度與低速車流。
- 壓電式偵測器(Piezoelectric sensors)：將壓電式感應器沿著車道設置於道路表面，透過壓電效應將壓力、加速度轉換成電子訊號，可用於測量車重與車速。
- 磁感應線圈(Magnetic loops)：將感應線圈埋於車道底下，由於車輛通過線圈時，會產生磁感量的變化，藉此可測出該車道之流量及占有率。

除了上述主要的侵入式偵測器外，另外隨著通訊技術的進步，陸續有非侵入式偵測器被開發出來，採用不破壞路面的遙感觀測，利用各種偵測方法以遠距離偵測來獲得交通資訊，有別於侵入式偵測器，非侵入式偵測器無須破壞鋪面，且架設與維護時對交通影響程度小，以偵測技術可主要分為以下幾種：

- 紅外線式 (Passive and active infra-red)：可分為主動式與被動式兩種，利用紅外線偵測車輛位置、速度與種類。天氣氣候將影響其精準度，且偵測範圍有限。

- 超音波與被動聲納式(Ultrasonic and passive acoustic)：利用超音波反射之時間差可偵測車流量、占有率等資訊，其中超音波式主要架設於道路上方；而被動聲納式則設於路邊，在惡劣天氣(如下雪)與溫度會影響其效能。
- 微波雷達(Microwave radar)：以微波反射來偵測車種、車速等車輛資訊，且不受天氣變化影響。
- 影像式偵測器(Video image detection)：以錄影機紀錄車數、車種、車速等車輛資訊後，透過影像處理技術分析出需要資料，缺點為受氣候、光線等環境影響。

不同類型的偵測器有不同的優缺點與可量測的資料類別，總結來看，磁感應式與壓電式等侵入式偵測器，架設時需破壞鋪面且施工耗時、維護不易，另外，在某些路段也較容易損壞，如重車比例高之道路。紅外線式與影像式偵測器對於不同的氣候、光線，其精準度影響甚大。超音波與被動聲納在都市的吵雜環境下易受到干擾並不適用，溫度、濕度亦會影響精準度。另外，大多數偵測器僅限於單車道偵測，要全面進行路網偵測所需要之建構成本與維護成本皆相當龐大，而目前能達到可偵測多車道並同時提供車輛數、即時車速與車種的車輛偵測器為影像式與微波式偵測器，但影像式偵測器受限於天候、光線的影響，在氣候不佳時，其精準度也會隨之下降。故從架設、維護設備成本低與對交通影響程度小，且不受天候影響的考量下，本研究選擇微波雷達車輛偵測器作為收取車輛通過訊號的設備。

本研究以交通部運輸研究所開發的微波雷達偵測器[31]作為研究使用的硬體架構，透過雷達天線發射出電磁波，當有物體(車輛)通過時，會產生雷達回波，再以天線接收回波後轉換成電壓訊號，經快速傅立葉轉將訊號由時域轉至頻域，之後透過交通參數演算法計算可得到具有意義的交通路網行車資訊。

在求得各種交通資訊(如車速、車種等)時，須要先確定有車輛通過雷達偵測範圍，當系統能準確地判斷出代表車輛的訊號時，才能對該訊號特性做後續分析。因此，本研究將以雷達實際收取訊號作為分析對象，建立一套偵測車輛通過的演算法，並利用訊號模擬方法與實際雷達訊號資料來驗證本研究方法的準確性。

1.2 研究目的

本研究藉由雷達偵測方式，利用車輛通過雷達偵測範圍時，造成的雷達反射訊號特性，來進行車輛偵測，以模擬訊號方式來驗證本研究之方法在低信噪度的訊號下，

具有較佳的車輛偵測能力，再以實際道路的雷達訊號作為資料來源，進行數值分析。期望能得到一套有效的車輛偵測方法。

本研究預計達成以下幾點目標：

1. 在透過雷達硬體將多車道資訊以帶通濾波器(Band Pass Filter)轉成單車道資訊後，提出一套針對低信噪度環境下，仍可有效判斷有無車輛資訊之演算法。
2. 針對車輛訊號的辨識，利用譜熵計算來建立一套訊號辨識門檻方法，與隨時間更新之機制。
3. 以訊號模擬模式產生不同信噪度的訊號，進行本研究方法與能量門檻法的辨識率比較。

1.3 研究範圍

本研究以微波雷達車輛偵測器作為研究硬體架構，採用路側架設的偵測方式，將雷達波側向往車道打出，以雙向多車道的道路結構作為車輛偵測環境，透過雷達波反射原理，將通過雷達偵測範圍的各型大小車(不包含摩托車)作為分析對象。

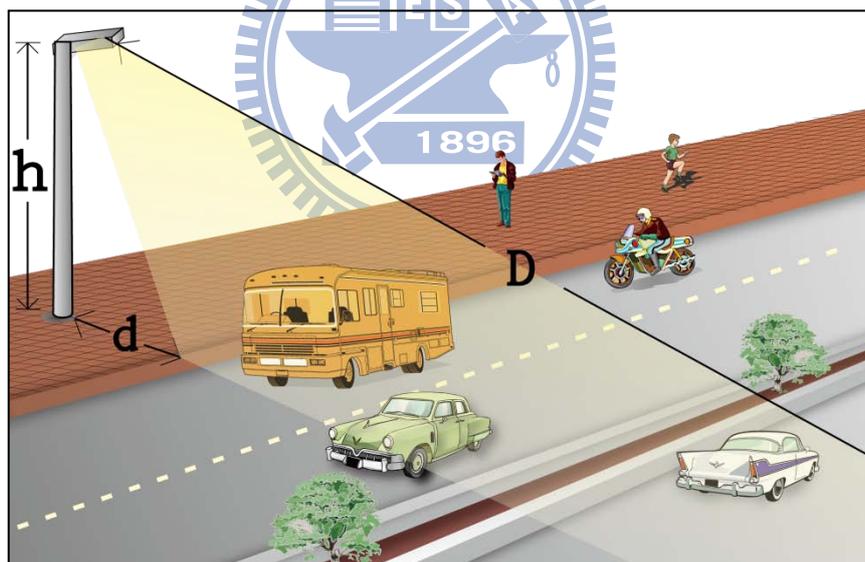


圖 1.1 雷達偵測多車道環境示意圖

資料來源:[9]

圖 1.1 表示車輛偵測器架設的示意圖，可以看出雷達偵測器偵測方向和道路呈垂直，偵測器架設高度為 h ，離道路邊距離為 d ，可偵測最遠通過車輛的距離為 D ，針對偵測器所涵蓋的偵測範圍進行雷達波的發射與接收，並透過差頻與傅立葉轉換可求得物體距離偵測器的相對距離與對應的訊號強度。

1.4 研究內容

本研究以端點檢測理論為研究架構，搭配訊號處理領域之熵資訊理論，針對我們採用雷達偵測器所收取的資料特性，找出車輛通過時的訊號特徵，以建構一套判斷有無車機制。研究流程如圖 1.2 所示，茲將流程圖中各步驟說明如下：

1. 研究範圍界定

決定雷達偵測器架設的地理環境結構以及偵測對象，並根據研究背景與目的來描述與界定問題。

2. 文獻回顧

蒐集國內外雷達偵測演算法的相關文獻，接著說明引入端點檢測法之動機並回顧端點檢測法之相關研究文獻，最後整理重要的資訊熵相關文獻，將既有研究整理出本研究的研究方向。

3. 雷達偵測器回顧

對於本研究所採用的微波雷達偵測器，進行硬體架構以及雷達偵測原理整理。

4. 以資訊熵建立辨識門檻

以資訊熵概念引入訊號偵測，由譜熵的計算方法來決定訊號能量，由此計算訊號能量方法來設計一門檻設定與更新機制，此門檻可隨時間變動而進行更新，並且不會因為車輛通過訊號而拉高門檻值導致誤判。

5. 端點檢測模式

決定出門檻後，以此門檻可以作為端點檢測之基準，將訊號狀態分為無車階段、有車在偵測範圍以及車輛離開偵測範圍等三種狀態，比較每一幀的訊號譜熵與門檻值大小，來決定狀態的轉移。

6. 以模擬訊號進行方法比較

本研究採用譜熵門檻法來進行訊號偵測，推測在低信噪度的環境下，本研究方法將比傳統能量門檻法有更好的辨識結果，因此利用模擬訊號模式來針對不同

信噪度的環境產生模擬訊號，並分別以本研究方法與傳統能量門檻法進行辨識結果比較。

7. 以實際雷達訊號進行實例分析

以實際雷達偵測器收取訊號作為訊號偵測資料，以本研究方法與傳統能量門檻法進行車輛訊號偵測，比較不同方法結果的優劣，並對照模擬訊號結果。

8. 結論與建議

對本研究過程與結果提出結論與建議，並提出後續可以進行研究的方向。

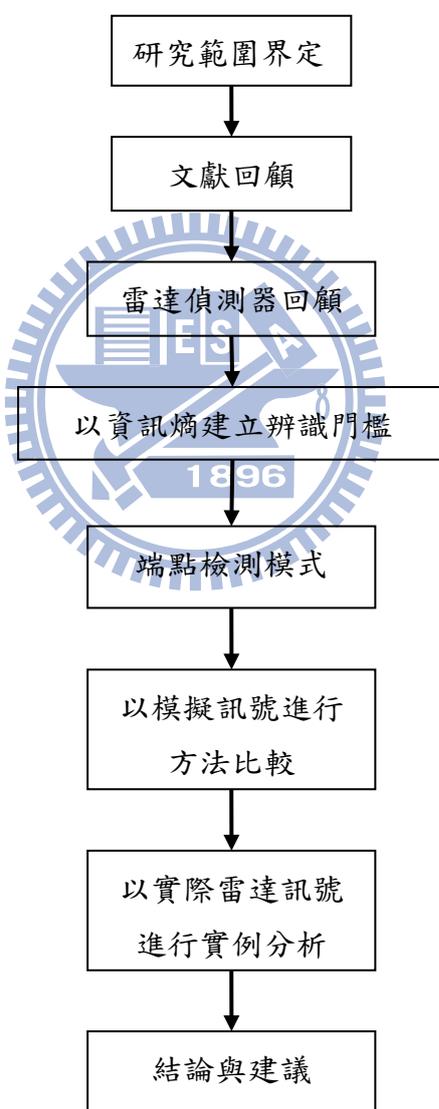


圖 1.1 研究流程圖

第二章 文獻回顧

解決交通路網問題，需憑藉完善的交通管理策略，並正確的分析與執行才能解決之。因此我們透過雷達偵測器蒐集雷達訊號，經由交通參數演算法而求得的交通資訊，以作為管理策略可參考的指標。在交通參數演算法中，最重要的元素為車輛有無判定，有此基礎參數之後，方可進一步求得車輛數、車種、車速等重要交通參數。以下將在第一節針對目前微波雷達車輛偵測器的理論技術進行回顧，第二節則整理本研究所使用的端點檢測法的相關文獻，最後一節介紹資訊熵的重要文獻。

2.1 微波雷達偵測演算法相關文獻

本研究採用的微波雷達偵測器，其主要原理係透過發射一頻率調變連續波 (Frequency-Modulated Continuous Wave, FMCW)，藉由目標物體的雷達回波來計算時間差，求得目標與偵測器之距離，不論在軍事、商業上 FMCW 雷達偵測器都應用相當廣泛。

Stove (1992)[24]針對 FMCW 雷達偵測的特色作一介紹，如 FMCW 雷達是打出一到高頻帶的雷達波來偵測物體，對於環境干擾的抵抗性較好，另外，由於發射的波是一連續的頻率調變波，藉由計算可以很容易就得到物體的距離資訊，如用於導航的 FMCW 可以隨著需求來求解不同距離單位下的物體最佳距離位置。

Zhang 等人(2007)[28]以小波轉換(Wavelet Transform)來進行雷達訊號偵測，所謂的小波轉換是利用有限長度的母小波(Mother Wavelet)的波形來表示偵測器收到的訊號。如一雷達收到的原始訊號可以以數個母小波的組成來呈現，文中作者透過計算各母小波的係數，將原始訊號拆解成各母小波的頻譜表示。根據中央極限定理，整個母小波的加總集合其分配將趨近於高斯分配，為了找出足以代表這個集合的獨立母小波，當某些母小波分配的非高斯程度越大時，這些母小波即可代表整個母小波集合。再針對這些母小波進行門檻檢驗，若訊號能量高於門檻時，則可以知道在這個母小波集合下，所對應的原始訊號為有車訊號。

Genderen(2006)[4]以雷達偵測器對於目標物體進行長時間的偵測，收集目標物的訊號資訊以建立訊號特徵值對應的機率值，得到這些機率作為事前機率(prior probability)，以貝氏演算法來對目標訊號進行偵測。同樣以統計方法來偵測訊號的還有 Malboubi 等人(2006)[17]，以最大概似法來估計目標物的訊號頻率，得到估計的頻率後，以都卜勒原理來求得目標物位置。

Musch(2002)[19]以 24GHz 的 FMCW 雷達偵測器作為偵測硬體架構，透過雷達波的反射，計算目標訊號的相位角變化，由於物體的移動會造成訊號的相位角改變，以相位角的斜率變動程度來推算物體距離。

Leung 與 Minett(1997)[13]提出一套模糊陰影理論(Fuzzy Shadow Scheme)來進行目標偵測，其原理可用圖 2.1 來說明，當物體落在雷達的偵測範圍內，由於雷達波是直線前進，打到物體時，會在物體後面的區域產生一塊雷達波打不到的陰影區塊，而該陰影區塊因為被物體所擋住，所以反彈的雷達回波只包含雜訊(noise)而無雜波(clutter)資訊。由圖 2.1 可以知道整個偵測範圍可以分為三種可能的狀態，分別是雜波區段(A)、目標物區段(B)與陰影區段(C)，其中雜波區段裡包含雜波訊號與雜訊，目標物區段包含目標物訊號、雜波與雜訊，而陰影區段就只包含雜訊。透過假設檢定，可以得知各狀態的區段位置。因為陰影區段產生必定是有物體擋到雷達波，所以可以藉由計算平均雜波能量是否有下降來判斷有無陰影區段的產生，藉而知道是否有物體存在於偵測範圍內。

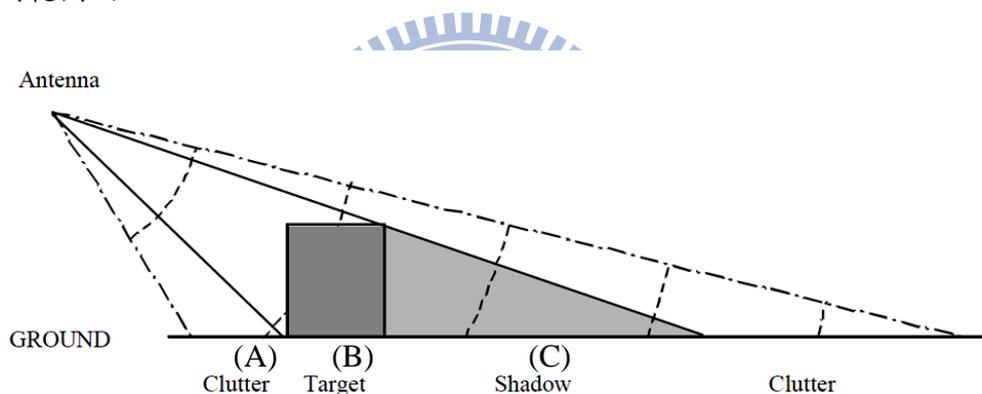


圖 2.1 模糊陰影理論之雷達偵測示意圖

資料來源:Leung et al. [13]

根據 Zhang(2008)[27]指出，在基礎的雷達偵測中，通常是根據接收訊號的強度來估計目標物所在的位置與大小，而微波雷達偵測器同樣也可依此來判斷是否有車輛通過會進入偵測範圍。一般情況下，可以將接收訊號在頻率 K 得到的能量值表示成：

$$P(k) = P_v(k) + P_b(k) + P_n(k) \quad (1)$$

其中， $P_v(k)$ 代表頻率 k 時的車輛能量值

$P_b(k)$ 代表頻率 k 時的背景值

$P_n(k)$ 代表頻率 k 時的雜訊且 $P_n(k) \sim N(0, \sigma^2)$

通常在偵測時候，會假設 $P_n(k)$ 可忽略，因此接收的雷達回波能量值主要包含 $P_v(k)$ 與 $P_b(k)$ 兩部分，假設偵測期間內有 M 個雷達回波值，其中有 N 個為車輛進入偵測範圍時所得到，則(4)式可以改寫為：

$$\begin{aligned} P(k) &= \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M [P_v(k, i) + P_b(k, i) + P_n(k, i)] \\ &= \lambda f(P_v(k)) + P_{b0}(k) + \sigma^2 \end{aligned} \quad (2)$$

其中， λ 為車輛雷達回波數與收到雷達回波數的比值， $\lambda = \frac{N}{M}$

$f(x)$ 代表車輛的能量函數

$P_{b0}(k)$ 代表頻率 k 時的背景值

Zhang 提出背景判斷方法，以提供車輛通過時偵測使用，令門檻值為 P_{th} ，其門檻演算法定義如下：

$$P_R(k, i) = P_R(k, i) \cdot g(P_R(k, i)) \quad (3)$$

其中， $g(P_R(k, i)) = \begin{cases} 0, & \text{if } P_R(k, i) > P_{th} \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases}$

則背景值 $\hat{P}_{b0}(k) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M P_R(k, i)$

一但背景值被決定之後，可利用收到的雷達回波訊號扣除背景值後，再設定一適當門檻值來進行偵測。但作者並未對如何設定一適當門檻值提出方法論。

同樣地，國內常見的 RTMS 偵測器[2]也是利用反射車輛的訊號能量大小來判斷是有車通過該車道的雷達偵測範圍，如圖 2.2 所示，由圖可以看到不管有沒有車通過皆有背景訊號的存在，其背景訊號包括了靜止的障礙物(Barrier)，再扣除背景訊號的影響後，針對訊號設定一合適的門檻即可將車輛偵測出來。

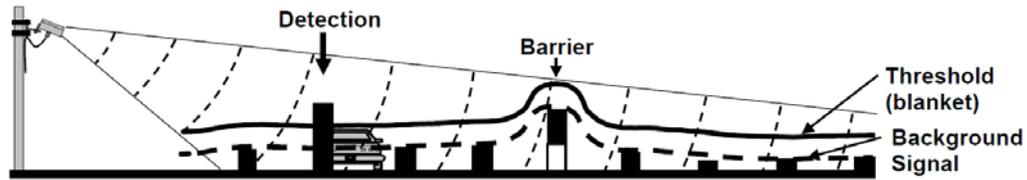


圖 2.2 RTMS 系統的反射訊號示意圖

資料來源:[2]

根據交通運輸研究所研究[31]指出，由於雷達偵測器偵測車輛的過程為車輛進入偵測範圍後，偵測器持續收到車輛的雷達回波，直到車輛離開偵測範圍。整個過程類似於傳統的單迴圈偵測器：車輛開始壓到迴圈偵測器直到車輛離開迴圈偵測器，故在偵測有無車輛通過雷達偵測範圍，其原理類似於單迴圈偵測器的計算方式，一開始根據偵測範圍大小建立一虛擬迴圈，將車輛反射的雷達訊號經由 DSP 處理後與背景值相減，以避免其他物體的雷達回波造成車輛有無的誤判。當車輛進入虛擬迴圈時，其所在車道的對應頻率範圍內，會有明顯能量變化，從頻域上找出該反射波之能量最大值。若最大值超過所設定的門檻值達到一定次數時，即可代表該迴圈內有車，反之，能量最大值連續低於門檻一定次數後，則判定迴圈內無車。

此方法之問題在於判定門檻值的設定方式與低信噪度的判斷結果不彰，針對門檻設定方法，以往研究主要以學習階段的平均能量門檻值作為後續判斷機制的基準，但因為缺乏門檻更新機制，對於環境變化並無法真實反映在該系統中，導致系統判斷準度會下降。另外，在偵測過程中，會遭遇到偵測環境有低信噪度的情況，如遠車道的車輛反射訊號，以傳統的能量門檻法來看往往會因為目標訊號與雜訊能量相差不大，造成車輛通過時，系統無法偵測出車輛。本研究提出一套以資訊熵計算能量的訊號端點檢測方法與門檻更新機制，以在低信噪度的不利環境下仍可有好的判斷結果。下面將介紹端點檢測法的相關文獻。

2.2 端點檢測法相關文獻

根據實驗觀察可以得知，雷達回波轉換成電壓訊號後，其訊號特性與聲音訊號有很大的相似性，在語音辨識系統中進行語音偵測相當於微波雷達偵測器中進行車輛偵測，可由圖 2.3 與圖 2.4 來說明，圖 2.3 為一段語音片段，包含了 Li、Chiao 與 Tung 三個字，利用端點檢測法可將每個字所對應之訊號予以辨識出來。而圖 2.4 為本研究之雷達訊號，為一串車流經過雷達偵測範圍，由圖片對照我們可以發現，不論是語音訊號亦或是雷達訊號，它們皆是隨時間變動且目標訊號(語音訊號或車輛訊號)和雜訊相比之下，目標訊號能量會比雜訊更強。因此，可以得到以下對比關係，在語音辨識

的一段語音訊號相當於是雷達訊號中的一段車流訊號，而語音訊號中的每個字所對應之訊號就相當是一段車輛中每台車輛的訊號，藉由語音辨識系統中的端點檢測(endpoint detection)理論應用於雷達偵測器上的有無車訊號辨識。

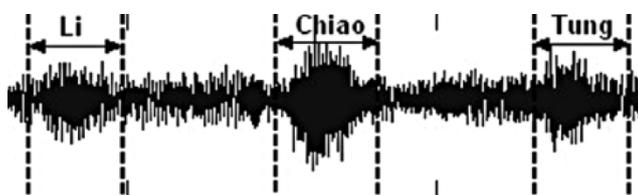


圖 2.3 語音訊號圖

資料來源:Li [15]

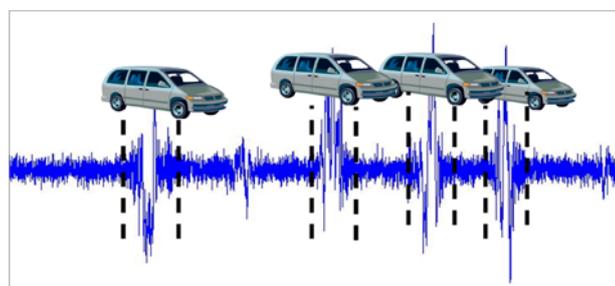


圖 2.4 雷達訊號圖

資料來源:本研究整理

端點檢測法(Endpoint detection method)是一套被廣泛使用的訊號辨識方法，最一開始是由貝爾實驗室[1]用於電話的傳輸與轉換系統，作為指派電話通訊通道的依據，以端點檢測法偵測講話者的聲音起點，並把空閒的通訊通道分配給該講話者使用。之後陸續有各種語音偵測演算法被提出，分別應用於人聲辨識、回音消除、聲音編碼等領域。

Lamel 等人(1981)[11]以對數能量來計算收到的訊號能量，並予以劃分為各種等級，選擇最小等級的訊號能量作為背景雜訊值，兩者相減即可得到目標訊號能量函數，以此可設定適合的門檻值來進行端點判斷。

Ney(1981)[20]事先將訊號狀態分為三種，語音訊號發生前的無語音訊號($k=1$)、語音訊號($k=2$)與語音訊號發生後的無語音訊號($k=3$)，將收取的聲音訊號片斷轉換成成本函數(cost function)來表示，其成本函數為 $C_k(i)$ ，代表第 i 個訊號片段轉到第 k 種訊號所需的成本。假設語音訊號的起始點與結束點分別為 i_b 、 i_e ，則轉換後的總成本為：

$$C(i_b, i_e) = \sum_{i=1}^{i_b-1} C_1(i) + \sum_{i=i_b}^{i_e} C_2(i) + \sum_{i=i_e+1}^N C_3(i) \quad (4)$$

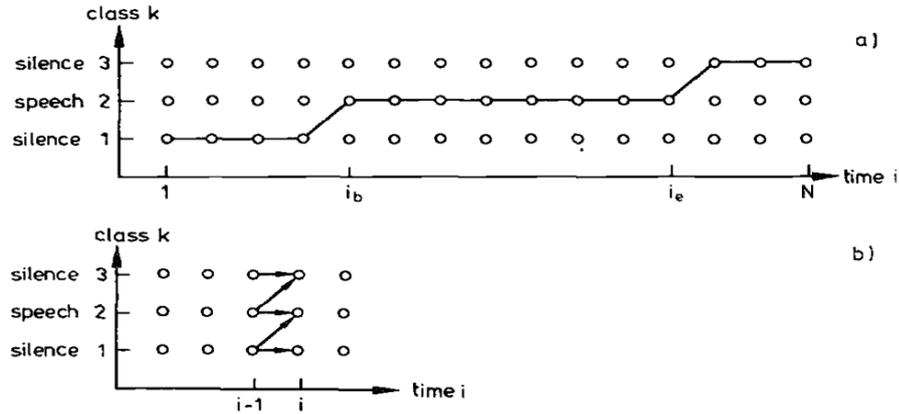


圖 2.5 (a)端點檢測的狀態模式圖

(b)時間 i 下的狀態轉換圖

資料來源：Ney [20]

由圖 2.5 (a)可以看到每一對 (i, k) 可以對應到一個成本函數 $C_k(i)$ ，其中 i 代表時間點， k 則代表該時間點下的狀態。在第 i 個時間點時，其狀態變化情形可以改成圖(b)所示。

為了找到最佳的端點 i_b 、 i_e ，須要找出從 $(1,1)$ 到 (i, k) 的最佳路徑與對應的 $C_k(i)$ 。由於訊號端點位置發生在訊號狀態改變的位置，故將每個訊號轉換到各自的三個狀態的總成本求最小化，即令(4)式最小化即可找出最佳的端點位置。

Hussain 等人(2000)[7]提出能量曲線判別法(Energy contour method)，將訊號能量以時域表示後，透過門檻值設定，可找到有聲音區段的端點位置。但僅僅由能量曲線來看端點位置會造成一些低能量訊號的誤判(如氣音或摩擦音)，因此，有研究者提出 R-S 端點偵測法(Rabiner and Sambur method)，此方法是由 Rabiner 與 Sambur 在 1974 年所提出的語音訊號端點檢測法，此方法利用訊號的能量曲線與越零率參數，由於氣音或摩擦音在訊號中的頻率比一般聲音高，利用此特性的方式即為計算時間窗內訊號穿過零的次數，此為越零率。

越零率參數之數學式：

$$ZCR(n) = \sum_{i=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} u[\text{Sgn}(-s(p+i) \times s(p+i+1))] \quad (5)$$

其中， $u(x)$ 為步階函數，函式為 $u(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$

$Sgn(x)$ 為符號函數，函式為 $Sgn(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases}$

由(5)式，可以知道當目前訊號取樣值與下一個取樣值相乘，若兩者為同號，則乘積為正值；反之，則乘積為負值，代表訊號跨越零基準線。

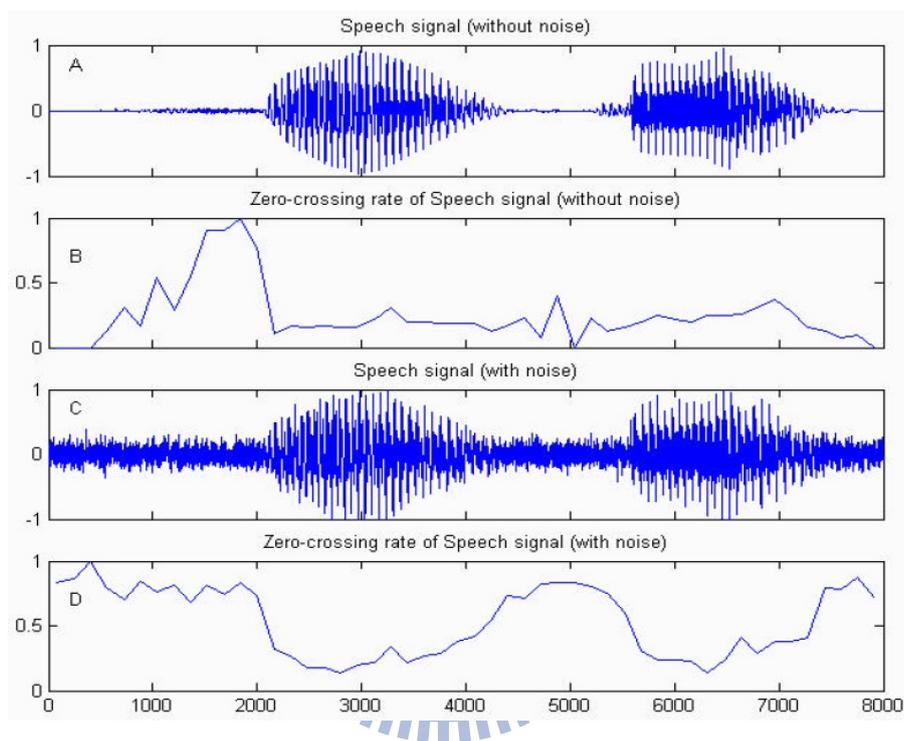


圖 2.6 越零率參數例圖。

資料來源：Hussain [7]

圖 2.6 為越零率的例圖，A 為無雜訊下的聲音訊號圖，B 為其對應之越零率圖，可以觀察到語音的訊號片段的越零率比氣音或摩擦音的片段來的低，因此可藉由此法找出語音的端點位置。但是越零率的抗噪度不強，圖 C 為含有雜訊的聲音訊號圖，而圖 D 為對應的越零率圖，由圖 C 與圖 D 可觀察到，在有雜訊的干擾下，D 圖呈現出越零率並無法實際呈現語音片段的特性，越零率參數對於雜訊抵抗能力弱，會因為受到各種雜訊影響而無法從雜訊中辨識出聲音訊號。

以上端點檢測方法包含了訊號能量參數、越零率、訊號持續時間等參數來決定端點的位置，但在實際應用上對於雜訊的抵抗效果並不強，且無法完整呈現目標訊號的特性，

在低信噪度的環境下，辨識效果會越趨不準。因此，有研究提出其他參數以供訊號辨識。

Rabiner 與 Sambur(1997)[21]以線性預測係數(Linear prediction coefficients, LPCs)與能量參數來進行端點檢測，線性預測是在時域上將過去收集資料給予代表符號 a_i ，以此來預測目前訊號所對應的符號。舉例來說，假設已知的一訊號片段其電壓值 $V_i, i = 1 \sim 5$ ，分別為(50,53,49,47,56)，則經過符號轉換後可以得到一組(50,3,-1,-3,6)的 $a_i, i = 1 \sim 5$ 。以線性函數方式來預測下一個時間點的符號值 a_6 ，其算法如下：

$$\hat{a}_i = a_{i-3} \cdot w_{i-3} + a_{i-2} \cdot w_{i-2} + a_{i-1} \cdot w_{i-1} \quad (6)$$

其中， w_i 代表時間 i 時， a_i 所對應之權重。

透過此方法可以用過去已知訊號資料預測接下來的訊號，再與實際收取的訊號相比較，得到兩者的差距值，即可推得時間點 $i+1$ 的訊號狀態，由訊號狀態改變可以得到對應的目標訊號的端點位置。

Haigh(1993)[6]以倒頻譜分析來取代以往的能量與越零率分析方法，除了可以改善過往方法的缺陷外，他也對於倒頻譜分析方法提出改進方法，傳統的倒頻譜分析方法著重於訊號在時域上的每一個時間點變化，而文中提出的改良式倒頻譜分析則著重於語音訊號與背景雜訊相連片段的變化。倒頻譜計算方法為將原始訊號轉成類似分貝記量單位，其算法可以表示成

$$energy = \ln \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad (7)$$

其中， x_i 為原始訊號能量

n 為訊號取樣數。

代入加權尤拉距離公式

$$d = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p (c_i - c_i')^2 \quad (8)$$

其中， p 為倒頻譜訊號中的頻率數

c_i 、 c_i' 為第 i 個時間點時，倒頻譜向量中的元素

因為尤拉距離是以幾何空間概念，將每個時間點上的訊號視為一個維度，每一個頻率看作一個點，去計算點與點在 p 維空間裡的距離，距離越大則相似度越小，反之距離越小則相似度越大。由實驗可以知道，因為語音訊號的變化幅度較大，其各點計算得到的尤拉距離變異程度大，如下圖(a)，可以看出其分佈較散；反之，因為無語音訊號主要為背景雜訊，訊號間的變化幅度較小，其分佈就較為集中，如下圖(b)。藉由此差異，便可設定適當的門檻值來區別語音訊號與非語音訊號。

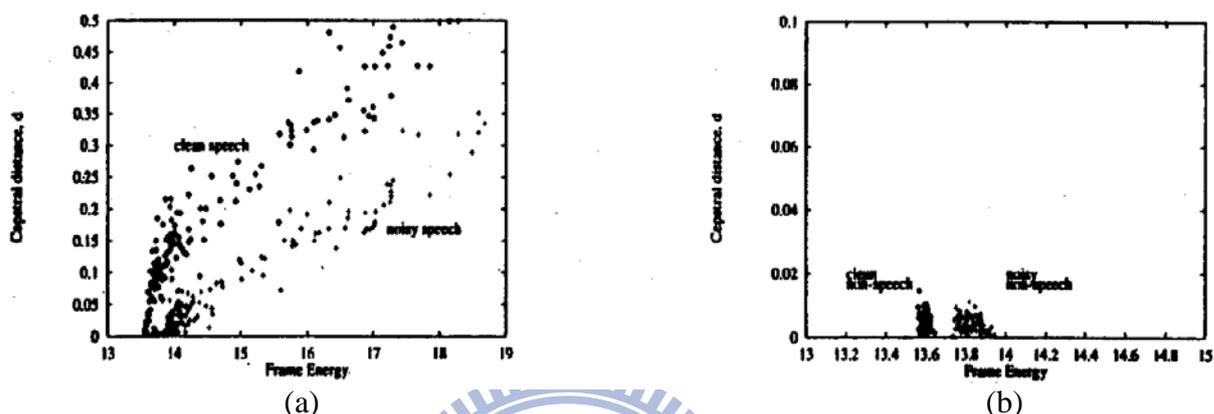


圖 2.9 (a)語音訊號片段中，各點的尤拉距離-對數能量分布圖

(b)非語音訊號片段中，各點的尤拉距離-對數能量分布圖

資料來源：Haigh [6]

線性預測模式分析法與倒頻譜分析法對於目標訊號有較好的特徵辨識能力，對於端點的辨識有更好的效果，但同樣在惡劣的環境下，辨識效果並不理想，對於雜訊的抵抗不高，尤其是線性預測模式，有研究指出會和雜訊有高度相關性，對於實際應用層面並不理想。之後有 Junqu 等人(1994)[10]提出時間-頻率(Time-frequency, TF)參數，因為各種雜訊能量在頻域下會集中在不同的頻帶，根據實驗觀察後，假設頻率在 250-3500Hz 範圍內所受到雜訊影響程度小，以固定此範圍內的頻域能量與時域能量合成，透過這種計算能量方式來設定門檻值可以幫助降低雜訊對於辨識率的影響。Wu 與 Lin(2000)[26]以混合頻帶技術來改良 TF 參數，提出一套適應頻帶選擇(Adaptive band selecting, ABS)方法來幫助系統選擇目標訊號所在的頻帶，其他的無用的頻帶給予刪除，有效降低雜訊對端點辨識的影響。

Li 等人(2002)[15]針對端點檢測法提出三點應該先設定的參數。

1. 決定訊號處理採用的時間窗函數
2. 利用能量函數來定義訊號大小。

3. 設計適當的濾波器來減少雜訊干擾。

Li 與 Yingle(2007)[14]對於端點檢測法提出一套複雜度測量(Complexity measure)理論來取代傳統的訊號能量、越零率等方法，利用 Kolmogorov 在 1965 年提出的複雜度理論來描述訊號的非線性特徵。首先將原始訊號 $x(t)$ 以傅立葉轉換至頻域訊號 $x(k)$ ，取其平均頻率大小 $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x(k)$ ，比該頻率大的高頻被視為提供訊號規律的部分；而比該頻率還低的低頻則被視為提供訊號隨機變動的部分。研究中取高頻的部分並進行排序得到 $x'(k)$ ，利用傅立葉逆轉換即可得到隨時間序列排序的訊號 $x_1(t) = F^{-1}[x'(k)]$ ，再透過複雜度測量公式 $A_1 = g[x_1(t) - x(t)]$ ，可得到訊號變動程度的資訊，比較不同訊號片斷的複雜度大小，來進行訊號辨識。

Guo 等人(2010)[5]以短時距的訊號振幅與越零率來設計一雙門檻機制，以連續訊號的振幅大小變化作為第一道門檻，因為由雜訊到目標訊號再回到雜訊狀態，過程中的振幅變動劇烈，以此門檻可用來辨識兩者差異。但在偵測氣音等訊號時，由於訊號振幅相對不明顯，因此透過越零率來設計第二道門檻，以偵測出氣音等微弱語音。

2.3 資訊熵相關文獻

許多端點檢測法建立於能量估計的測量上，此類演算法在許多方面有其優點，如系統容易建立、對於雜訊特性不需特別假設等，然而由能量來判別端點的方法會造成系統對於雜訊能量大小相當的敏感，當雜訊變異大時，將會降低系統的檢測準度。能量端點檢測法在訊號偵測的過程中，常需要假設目標物體的訊號能量比雜訊能量值還要高的假設條件，但在現實的環境測量下，常會遭遇到目標訊號微弱的情形，使得能量端點檢測法無法從雜訊裡將目標訊號予以偵測出來。因此，本研究欲從資訊熵的角度來量測訊號。

熵的概念最早由 Clausius 在 1864 年提出的概念，被用在解釋熱力學系統的性質，即熵代表「一個系統不受外部干擾時，往內部最穩定狀態發展的特性」。之後 Boltzmann 於 1877 年發現單一系統的熵和熱力學講的氣體分子的微觀狀態有關係，以一個密閉容器內的理想氣體為例，對於氣體分子的微觀活動可由各分子中的原子位置與動量來描述之，在假設所有原子的總動能等於該氣體的總動能，波茲曼提出 $S = k \cdot (\ln \Omega)$ 公式，其中 S 代表整個氣體的熵，k 為波茲曼常數， Ω 為密閉容器內的微觀狀態數量。當系統可能存在的微觀分子運動狀態數目越多，熵就越大，而可能存在的微觀分子運動狀態數目越多，表示我們對於系統的狀態越不清楚。由此公式可以看出 Ω 為一個系統混亂程度的度量，透過波茲曼公式把熵和描述熱力學的機率分佈作一連結。

之後在 1928 年 Hartley[3]首度提出以對數函數作為度量資訊的工具，由 1949 年 Shannon[22]集其大成，以熵的概念應用於通訊處理方面，來定義訊號中的資訊量，建立資訊熵(information entropy)的概念。所謂的資訊熵被視為測量具有雜訊的訊號系統中其含有有用資訊的程度，可以定義為資訊中的不確定程度。根據 1957 年 Jaynes[8]的研究證明資訊熵的機率分佈等同於熱力學的熵，而熱力學的最大熵原理為一通用推論工具，因此便可將最大熵原理來應用於資訊理論。

在很多情況下，我們對於隨機發生的事件，並不了解其機率分佈情況，所掌握的僅僅指是某部分的資訊(如某些隨機變數的平均值等)，而最大熵原理告訴我們，在已知的資訊條件下，選擇使該訊息熵最大化的分佈為最有可能出現的情況。當我們還沒收到訊號前，並不知道其訊號的內容為何，但如果以資訊熵方式去量測此不確定性程度時，即可針對此訊號找到一些資訊。

如果一個事件有 n 種可能性的結果，每一個事件 x_k 所發生之機率為 $P(x_k)$ ，則結果未出現前的不確定程度 H 與事件發生機率的對數成正比，其方程式可表示如下：

$$H(x) = \sum_{k=1}^n P(x_k) \cdot \log \left[\frac{1}{P(x_k)} \right] \quad (9)$$

其中， x 代表某一隨機訊號，且 $x = \{x_k\}_{0 \leq k \leq n-1}$

x_k 表示其第 k 種的可能結果

$P(x_k)$ 表示該種可能結果發生之機率

資訊熵是作為一個片段訊號中，機率分佈表現為 (P_1, P_2, \dots, P_n) 時，所呈現的不確定程度或混亂程度。每對一個片段的訊號作一次資訊熵計算，可得到 $S(P_1, P_2, \dots, P_n)$ 的訊息量。

2.3.1 分帶譜熵 (Band-Partitioning Spectral Entropy, BSE)

由 Shannon 將熵概念引入訊號處理領域後，相繼有人進行後續研究，而 Shen 等人(1998)[23]首先以熵為基礎之演算法應用於端點檢測技術。根據他們實驗結果，可以發現目標訊號之譜熵與雜訊有相當的差異，即使在各種雜訊下的偵測環境，仍然可以將兩者與以區隔開，其譜熵參數計算如下表示：

$$X(k, l) = \sum_{n=1}^N H(n) \cdot S(n, l) \cdot \exp \left(\frac{-j2\pi kn}{N} \right) \quad , \quad 1 \leq k \leq N \quad (10)$$

其中， $X(k, l)$ 表示第 k 個頻率在第 l 幀的頻譜振幅

N 表示在每一幀的頻率數目

$H(n)$ 表示漢明窗函數，其覆蓋長度為一半窗長

每一幀的頻譜能量：

$$X_{energy}(k, l) = |X(k, l)|^2 \quad , \quad 1 \leq k \leq \frac{N}{2} \quad (11)$$

對於每一個頻譜能量所對應之機率 $P(i, l)$ 表示如下：

$$P(i, l) = \frac{X_{energy}(i, l)}{\sum_{k=1}^{N/2} X_{energy}(k, l)} \quad , \quad 1 \leq i \leq \frac{N}{2} \quad (12)$$

在給定的幀下，每一機率所對應之譜熵表示如下：

$$H(l) = \sum_{i=1}^{N/2} P(i, l) \cdot \log \left[\frac{1}{P(i, l)} \right] \quad (13)$$

其中， $H(l)$ 表示每 l 幀的熵。

由上式可得知熵和頻譜能量變化程度有關而非能量大小，藉由求每一個頻譜能量對應之機率，引入了訊號的分配特性，因此在不同程度的雜訊下，譜熵分析參數具有相當的穩定性，即使在低信噪度下，譜熵分析比訊號的純能量計算方式更能表現出訊號的特徵。另外，每個頻率點所計算出來的頻熵能量較容易受到雜訊之影響，造成端點檢測誤差增加，若改以數個頻率合成的頻帶作為訊號能量計算單位，可以降低訊號分析對雜訊的敏感度。而此合成的譜熵計算方式就稱為分帶頻譜熵(BSE)。

將原本(11)式中，以每一個頻率點來計算的頻譜能量，改用數個頻率合成的頻帶來計算頻譜能量，其每一幀之頻帶能量定義如下：

$$E_b(m, l) = \sum_{k=1+(m-1)*n}^{1+(m-1)*n+n-1} X_{energy}(k, l) \quad , \quad 1 \leq m \leq N_b \quad (14)$$

其中， N_b 表示每一幀的頻帶數

$E_b(m, l)$ 表示第 l 幀上的第 m 個頻帶能量

n 表示每一個頻帶包含的頻率數

同理，每一頻帶所對應之機率可表示為

$$P_b(m, l) = \frac{E_b(m, l)}{\sum_{k=1}^{N_b} E_b(k, l)}, \quad 1 \leq m \leq N_b \quad (15)$$

BSE 參數 $H(l)$ 則可表示為

$$H(l) = \sum_{m=1}^{N_b} P(m, l) \cdot \log \left[\frac{1}{P(m, l)} \right] \quad (16)$$

Wu 等人(2005)[25]提出一頻帶參數改進方法，透過取加權方法將目標訊號與雜訊之譜熵分開，較原始的譜熵分析有更好之辨識能力。

$$W(m, l) = \text{var}[P_{b'}(m-1, l), P_{b'}(m, l), P_{b'}(m+1, l)] \quad (17)$$

$$\begin{cases} P_{b'}(m-1, l) = \frac{\min\{P_b(l)\}}{P_b(m-1, l)} & \text{for all bands of the } l\text{th frame} \\ P_{b'}(m, l) = \frac{\min\{P_b(l)\}}{P_b(m, l)} & \text{for all bands of the } l\text{th frame} \\ P_{b'}(m+1, l) = \frac{\min\{P_b(l)\}}{P_b(m+1, l)} & \text{for all bands of the } l\text{th frame} \end{cases}$$

其中， $W(m, l)$ 表示第 l 幀上的第 m 個頻帶所對應之權重

$P_{b'}(\cdot)$ 表示正規化後的頻帶能量

由上式可以得知，在 $(m-1)$ 到 $(m+1)$ 的頻帶變化越大，則加權後之譜熵會更明顯；反之，若 $(m-1)$ 到 $(m+1)$ 的頻帶變化越小，則加權後之譜熵將更不明顯。由於可將雜訊之譜熵降低，同時提高目標訊號之譜熵，進行端點檢測之準確率更為提高。

改善後之 BSE 參數表示如下：

$$H_b(l) = \sum_{m=1}^{N_b} W(m, l) \cdot P_b(m, l) \cdot \log \left[\frac{1}{P_b(m, l)} \right] \quad (18)$$

2.3.2 適應分帶譜熵(Adaptive Band-Partitioning Spectral Entropy, ABSE)

因為不同類型的雜訊頻率能量會集中到不同的頻率帶，在一些極端惡劣的環境下(極低信噪度之訊號)會有某些頻帶會影響端點偵測之準度，因此需要一方法將這類頻帶(harmful band)予以去除或決定出有用之頻帶。Wu 等人(2000)[26]指出，含有雜訊的頻率帶會造成系統判斷的準確度下降，且這類含有雜訊的頻帶數量與收取訊號的雜訊

程度有關，雜訊程度越高，代表收取訊號之環境越不理想，含有雜訊的頻帶數量也越多。

而 Lin 等人(2002)[16]提出最小能量帶選擇(Minimum energy band selection)之方法來決定雜訊變動之資訊，該方法應用於譜熵分析並將譜熵予以正規化，即為正規化最小能帶(Normalized minimum band energy, NMinBE)參數，以該參數來決定目標訊號之有用頻帶數，其數學表示如下：

$$NMinBE(l) = -\log \left[\frac{\min\{E_b(m,l)\}}{\sum_{m=1}^{N_b} E_b(m,l)} \right] \quad (19)$$

其中， $\min\{\cdot\}$ 表示在給定的幀下，選擇最小的頻帶能量

Lin 根據實驗觀察得到在高信噪度的環境下，將會有越多未受雜訊污染的頻帶；而相對在低信噪度下，這些未受雜訊污染的頻帶數目會隨之下降。根據 NMinBE 參數計算結果後，可以得到未受雜訊污染的有用頻帶，再將全部頻帶數扣掉有用頻帶部分，剩下的頻帶部分即為無用部分可視為雜訊移除系統外。此一頻帶調整機制可以幫助系統降低計算量與辨識準度的提升，而加入此調整機制之 BSE 參數演算法則稱為適應分帶譜熵(Adaptive band-partitioning Spectral Entropy, ABSE)參數演算法，表示如下：

$$H_b(l) = \sum_{m=1}^{N_{ub}} W(m,l) \cdot P_b(m,l) \cdot \log \left[\frac{1}{P_b(m,l)} \right] \quad (20)$$

其中， N_{ub} 為根據實驗得到的頻帶數

2.4 小結

由於車輛的雷達回波訊號與雜訊的能量大小不同，傳統的車輛偵測方法為單純計算訊號的能量大小並設定一門檻值，當收到的雷達回波能量高於此門檻值時，則代表這個時候有車在雷達偵測範圍內；反之，則視為無車時的雜訊。但實際在進行車輛訊號偵測過程中，會遇到目標訊號能量較小的情況，如遠車道的目標訊號與雜訊的能量差異不大。在這種情況下，以傳統車輛偵測方法所設定的門檻，其車輛辨識能力明顯下降，因此，本研究以資訊熵的概念來計算訊號能量，藉由資訊熵計算過程中含有分配的資訊，以此來設定訊號辨識的門檻，期望可加強系統辨識能力。有了足以將目標訊號偵測出來的門檻後，以端點檢測流程將各目標訊號的端點予以辨識出來，以達到車輛偵測的目的。

第三章 雷達偵測器

3.1 雷達偵測器簡介

微波雷達偵測器的基本原理是利用目標物對雷達波的反射所造成的波形變化來發現目標，並可由此來測定目標的空間位置，一般微波車輛偵測器可分為兩種型式：都卜勒式與時間差式。都卜勒式偵測器在其偵測範圍內發射一固定頻率之電磁波，接收車輛的雷達回波後，以波頻變化算出車速。由於偵測理論建構在都卜勒效應，對於靜止車輛或低速車輛的偵測效果不彰。本研究之偵測器採用時間差式，主要原理係透過發射一頻率調製連續波(Frequency-Modulated Continuous Wave, FMCW)，藉由雷達回波計算波間時間差，求得被測車輛與偵測器之距離。

3.2 雷達偵測器硬體架構

偵測器硬體架構主要可分為天線模組、無線 RF 模組與數位訊號處理(Digital Signal Processing ,DSP)模組，其中天線模組包含發射與接收天線，無線 RF 模組則可分為發射端模組與接收端模組，如圖 3.1 所示。

一開始在發射端模組，先以三角波產生器產生一個三角波，由壓控震盪器(Voltage Controlled Oscillator, VCO)將該三角波轉至本偵測需求之頻率範圍，其中心頻帶為 10.525GHz，頻率範圍 50MHz。將此產生之雷達波以發射天線打出去，打到物體產生之雷達回波，由接收天線予以收取之後，將雷達回波送至混合器(Mixer)與產生之雷達原始波進行差頻，可得到一中頻(Intermediate frequency, IF)訊號，此中頻訊號包含了目標物的距離資訊可作為訊號分析的依據。最後再將此中頻訊號送至 DSP 進行訊號處理，經由不同的交通參數演算法即可得到各種交通參數，來提供有用的交通資訊。

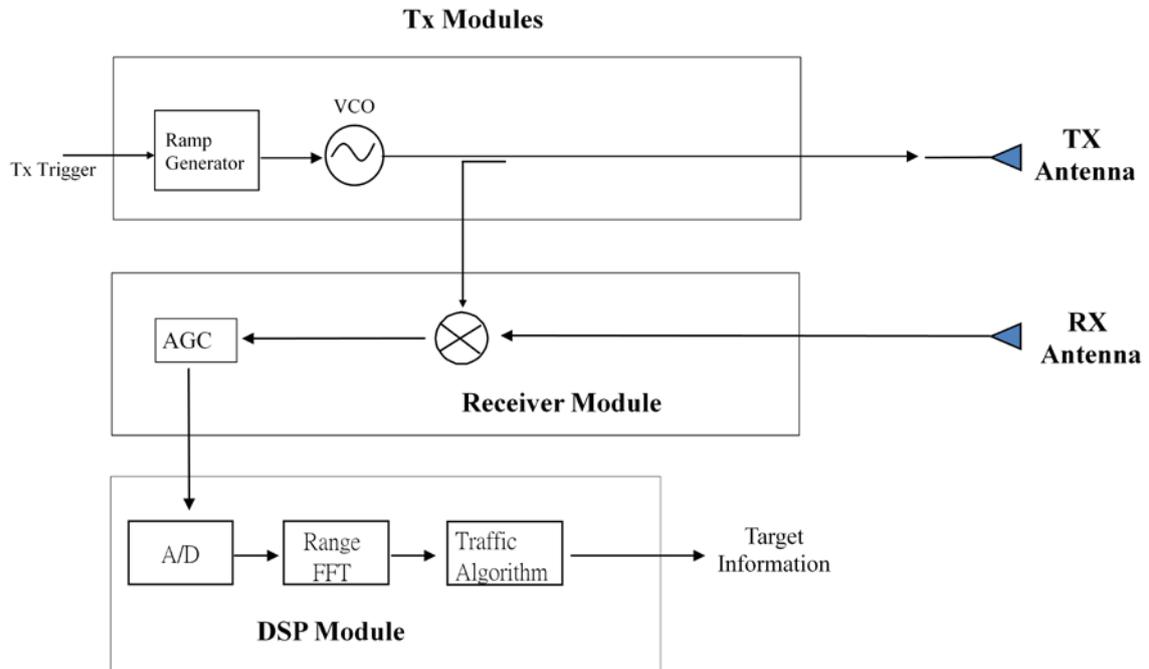


圖 3.1 雷達偵測器硬體架構

資料來源:本研究整理

3.3 雷達偵測器偵測原理

雷達微波偵測器的偵測基本原理，乃利用雷達波打到目標物後，對於該物體會產生雷達回波，而偵測器透過接收這些雷達回波，求得目標物的資訊。下圖 3.2，描述一偵測器透過打出原始雷達波，當雷達波打到物體 A 與物體 B 時，會產生不同的雷達回波，其雷達回波的特性會因為物體離偵測器遠近、本身材質、反射面積大小等有關，偵測器接收這些雷達回波後，與原始雷達波作比較，由其中差異找出雷達反射物的資訊。

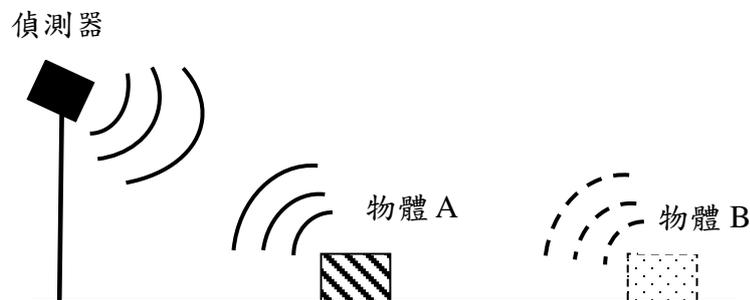


圖 3.2 雷達波運動示意圖

資料來源:本研究整理

本研究採用的調頻雷達(FMCW)透過測量雷達發射波與雷達回波之間的頻率變動來決定出目標物的距離。當雷達波打到物體而產生雷達回波時，該雷達回波的頻率會和發射波之頻率有所差異，發射波與回波在混波器進行差頻時，兩者之頻率差也就是所謂的拍頻(Beat Frequency)會隨著目標物與偵測器的距離改變而變動。如下圖 3.3 為兩個波的掃頻-時間波形圖，實線部分為雷達偵測器的原始射頻調頻訊號，虛線為偵測器收到的雷達回波，雷達訊號的頻寬為 ΔF ，掃頻時間為 ΔT 。由圖形可以看到，接收波與發射波的頻率差為 Δf ，延遲的時間間隔為 Δt ，當目標物體與偵測器的距離漸增時，頻率差也漸大。因此，計算某一時間的 Δf 即可獲得目標物的距離。

推導方式如下：

假設物體距離偵測器距離為 d ， C 為光速，由三角波比例關係可以得到

$$\frac{\Delta f}{\Delta t} = \frac{\Delta F}{\Delta T} \quad \text{且} \quad d = \frac{\Delta t \cdot C}{2} \quad (21)$$

藉由偵測器可以求得雷達回波與原始波的頻差，可得到

$$\Delta t = \frac{\Delta T}{\Delta F} \cdot \Delta f \quad (22)$$

代入(22)式，得

$$d = \frac{C}{2} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta F} \cdot \Delta f \quad (23)$$

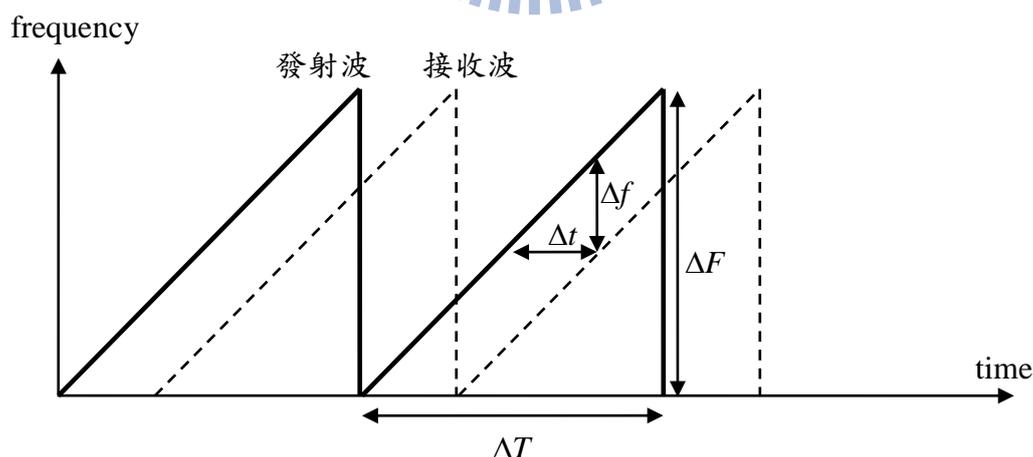


圖 3.3 發射波與接收波波型圖

資料來源:本研究整理

將圖 3.3 的例子，以電壓-時間波型圖來表示，則可表示如圖 3.4。紅色虛線為距離雷達偵測器較近物體的雷達回波 B，波受到物體反射，其頻率與周期產生改變，且波傳遞過程有能量耗損，最後收到的雷達回波轉回電壓值會比原始訊號小，另一方面因為距離較近，其頻率較低；黑色虛線部分是相對於紅色雷達波距離偵測器較遠的雷達回波 B，因此波的周期較小，頻率較高，符合上述計算距離的公式結果。不同物體的雷達回波特徵並不相同，但實際上雷達偵測器收到雷達反射訊號時，包含了各種雷達回波，所看到的是混合的雷達合成波，以下圖黑色實線部分作為代表(紅色虛線回波+黑色虛線回波)。

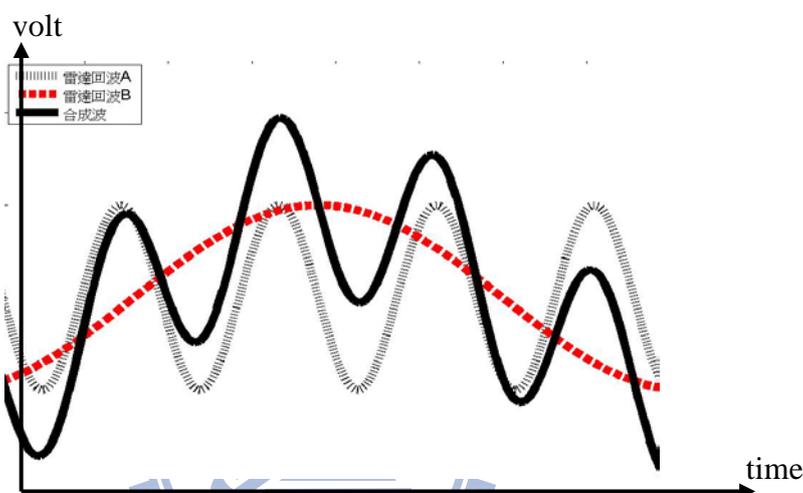


圖 3.4 電壓-時間波波型圖

資料來源:本研究整理

由於收到的雷達反射波為一混雜各種資訊的合成波，為了進行訊號分析，我們須將訊號的不同的頻率給予分離出來。因為接收雷達波為類比訊號，在進行訊號的頻率分離動作前，需對接收的雷達合成波進行取樣，將訊號由類比轉為數位，在同一長度的訊號中，若取樣點越多，則得到的數位訊號越接近原始類比訊號，但相對的計算資源也耗費越多，所以應該取一合理的取樣率已達到資源最佳利用。本研究以每秒 256K 點的取樣率來描述此合成波的長相(圖 3.5)，其取樣率的算法如下：

掃頻周期為 $\frac{1}{1000}$ 秒，每一周期取 256 點，相當每一幀有 256 個點的資料，而取樣率便可計算得 $256 \times 1000 = 256K$ (點/秒)，針對原始類比訊號取樣後，可由各取樣點來得到數位訊號以利於後續分析。

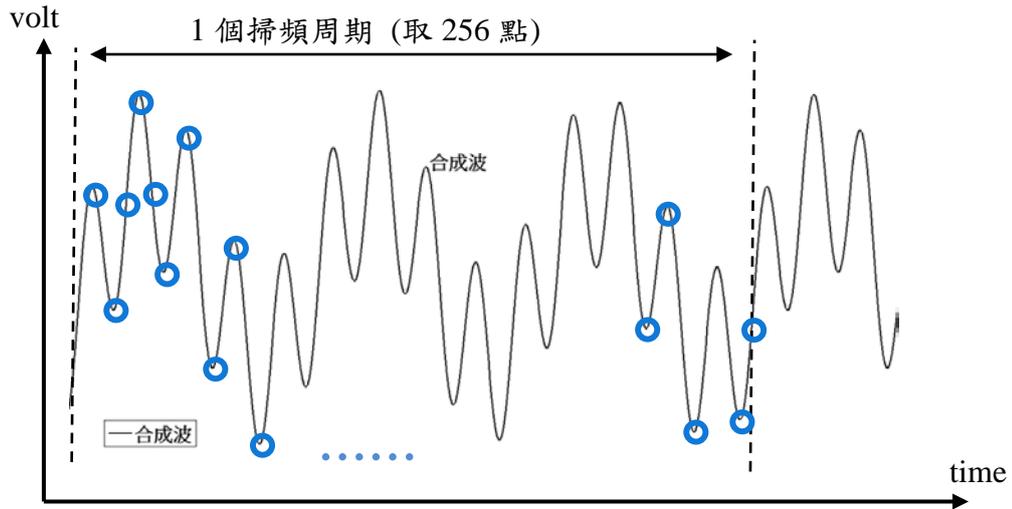


圖 3.5 接收合成波的取樣示意圖

資料來源:本研究整理

得到轉換後的數位訊號後，根據傅立葉轉換公式 $X_n = \sum_{k=0}^{N-1} X_k \cdot e^{i\frac{2\pi}{N}kn}$ ，能把訊號由時域轉至頻域。在雷達訊號特性中，頻域上的各頻率振幅大小所代表的為該頻率相對應的物體反射訊號大小，且由頻率可求得物體離偵測器的距離，因此，透過頻譜分析可以知道離偵測器某距離的物體雷達回波大小。圖 3.6 為訊號頻譜圖，根據取樣率可知道傅立葉轉換後之頻率數，本研究之頻率範圍為 $f=1$ 到 $f=256$ ，因為轉換後的頻率其訊號有對稱性，因此從 1~256 個頻率中取一半來做為後續分析資料。

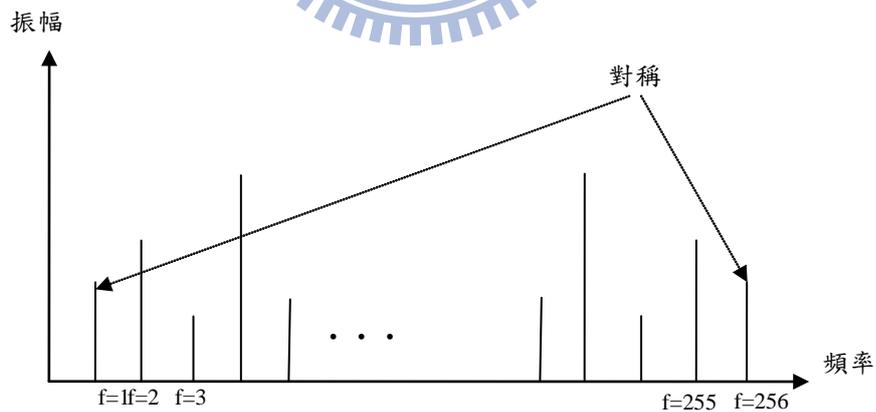


圖 3.6 接收雷達波之頻譜圖

資料來源:本研究整理

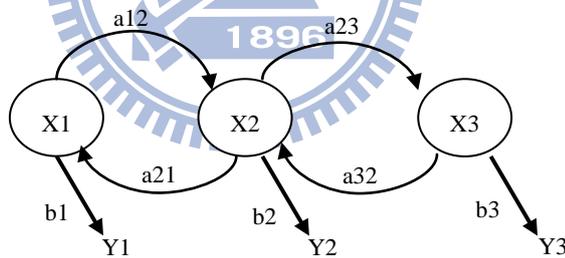
第四章 端點檢測譜熵分析模式

本篇研究以端點檢測譜熵分析為基礎，進行端點檢測以辨識出車輛通過之目標訊號，而與之前的相關研究有以下兩點差異，(1) 訊號能量的計算方式。(2) 建立一套門檻設定方式與更新機制，將介紹於下。

4.1 端點檢測簡介

以 FMCW 雷達收取訊號後，其雷達訊號必須經由處理，判斷哪些片段是有車輛通過，哪些是代表無車通過的雜訊，之後方能針對有車部分做進一步的分析，而此過程便稱為雷達訊號端點檢測。而訊號端點檢測最主要之目的在於，將訊號中有需要或有用的訊號部份擷取出來，在車輛辨識系統中，端點檢測所擷取之訊號樣本，以能讓系統辨識精準度達到最高為我們目標。

雷達訊號所對應的狀態可用一隱藏馬可夫模型(Hidden Markov Model, HMM)來表示，一般馬可夫模型是用來呈現狀態與狀態間的關係，由當前狀態的資訊可以用來預測未來狀態，而過去的狀態對於預測將來狀態為無關的，隱藏馬可夫模型同樣也是一描述系統狀態之統計模型，差別在於隱藏馬可夫模型無法直接觀察到狀態本身，是透過輸出的結果序列來推論狀態的訊息，表示如圖 4.1。



X：狀態

Y：可觀察得到的結果

a：狀態轉換之機率

b：狀態輸出之機率

圖 4.1 隱藏馬可夫模型示意圖

資料來源：本研究整理

而雷達回波訊號本身就如同一隱藏馬可夫模型，我們無法直接觀察到雷達反射訊號的每一個狀態與狀態間的變化，我們所能得到的訊息為雷達系統輸出的結果，透過輸出結果的分配型態，去推測狀態間的轉變，而訊號的端點檢測就是用來偵測是否發生車輛進出造成的訊號狀態轉變。

4.2 端點檢測法參數設定

由 2.2 節文獻回顧中，研究人員 Li 等人(2002)提出以端點檢測法進行訊號辨識時，需要決定以下要素：(1)時間窗的設定，(2)能量函數的設定，以下將針對此兩點作說明。

(1) 時間窗的設定

時間窗為一種訊號分段的處理方式，對於隨著時間變動之訊號而言，每次只對固定長度的時間窗所覆蓋的訊號範圍進行運算，每一時間窗運算得到參數值，依時間排序可得到該參數隨時間變化的特性。以數學觀點來看，時間窗分析相當於對訊號進行加權效果，也就是說，從訊號中擷取一小段訊號(其長度即為時間窗長度)，並對於所擷取訊號中的每一取樣點，給予不同的加權值，其造成的訊號效果也不相同。時間窗的長度將會影響訊號分析結果，當時間窗越長時其所需計算量相對減少，但所得到的參數值變化也較小，不易觀察出訊號隨時間的變化；反之，若時間窗長度越短，因為每次計算的取樣點數較少，容易受訊號變化所影響，觀察到的訊號變化較大，但相對系統運算量也會變大，在此介紹兩種常見時間窗：

矩形窗(rectangular window)

$$W_R = \begin{cases} 1 & 1 \leq n \leq L-1 \\ 0 & \text{o.w.} \end{cases} \quad (24)$$

其中，L 為時間窗的長度

若一訊號 $f(n)$ 經由矩形窗處理，其結果可表示為 $\hat{f}(n) = w_R(n) \cdot f(n)$

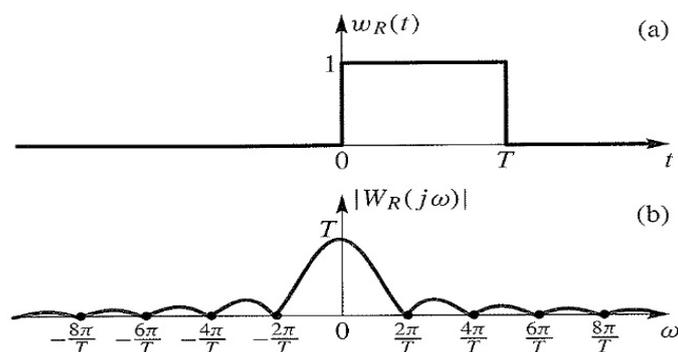


圖 4.2 (a)矩形窗 (b)傅立葉轉換之矩形窗

資料來源：Signal processing first [18]

漢明窗(Hamming window)

$$W_H = \begin{cases} 0.54 - 0.46 \cos\left(\frac{2n\pi}{N-1}\right) & 0 \leq n < L - 1 \\ 0 & \text{o. w.} \end{cases} \quad (25)$$

其中，L 為時間窗的長度

同樣，若一訊號 $f(n)$ 經由矩形窗處理，其結果可表示為 $\hat{f}(n) = w_H(n) \cdot f(n)$

與矩形窗比較，可明顯觀察該函數在時間窗中間有較大的值，而兩端的值則趨近於零。

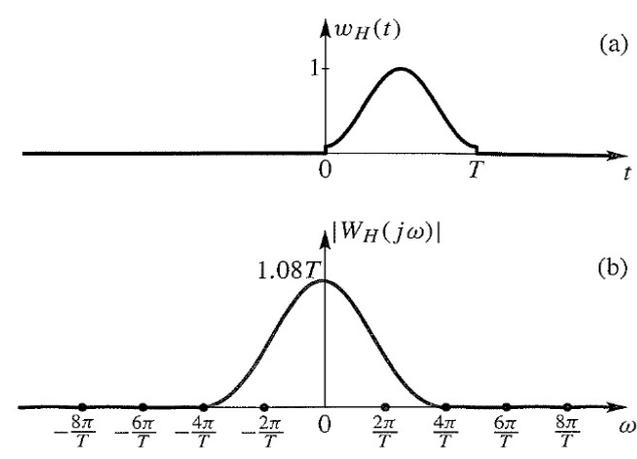


圖 4.3 (a)漢明窗 (b)傅立葉轉換之漢明窗

資料來源：Signal processing first [18]

取不同的時間窗其造成的訊號特性也不相同，在本研究中時間窗取漢明窗，是因為漢明窗具有加強時間窗左右端的連續性。我們進行訊號處理時，是取一段一段的訊號片段來分析，這些不連續的訊號片段在其訊號兩端會產生高頻，對於之後的訊號分析會有誤差的影響，透過乘上漢明窗來降低兩端高頻的現象，而讓整個訊號處理近似於一連續訊號的狀態，並可同時讓時間窗中間區段的目標訊號特徵更加明顯。

(2) 能量函數的設定

由能量函數的設定，可以決定時間窗內的取樣值運算方式，根據不同的訊號特性需要採用不同的方式，才能適當地表示出訊號變動特性。常見的能量參數設定如下：

平方和能量參數

以每一時間窗內訊號取樣值的平方和，作為該時間窗的能量參數估算值

$$E(n) = \sum_{i=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} [s(p+i)]^2 \quad (26)$$

其中， $E(n)$ 為第 n 個時間窗的能量估計值

p 為該時間窗之中心點位於原始訊號的位置

N 為時間窗的長度

均方和能量參數

由於平方和參數值會隨著時間窗之長度大小而有所差異，為了避免時間窗長度所造成的影響，一般都會作平均化處理

$$E(n) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} [s(p+i)]^2 \quad (27)$$

絕對值和能量參數

以上兩種能量估算方法都需進行平方計算，為了減少能量參數的計算量，取時間窗中訊號的絕對值和，作為能量估算值。

$$E(n) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} |s(p+i)| \quad (28)$$

上述的訊號能量計算方式，為訊號分析中常用的能量計算方式，但以這些單純考量訊號的能量值的計算方式，所建立的訊號偵測門檻在目標訊號與雜訊兩者訊號能量差異小時，會造成門檻辨識效果下降，產生誤判的情況，因此本研究引入熵的概念，來建立新的門檻計算方法。

4.3 門檻設定與更新機制

本篇研究以譜熵分析為基礎，進行端點檢測以辨識出車輛通過之目標訊號，而與之前的相關研究有以下兩點差異，(1) 訊號能量計算方式，(2) 建立一套門檻設定方法與更新機制，將分別介紹此兩點於下。

(1) 訊號能量計算方式

當訊號經由傅立葉轉換與加窗後，可以得到一頻域上的訊號資料，而每一幀上有數個頻率所對應的能量值，可以表示成以下公式：

$$X(k, l) = \sum_{n=1}^N h(n) \cdot S(n, l) \cdot \exp\left(\frac{-j2\pi kn}{N}\right) \quad , \quad 1 \leq k \leq N \quad (29)$$

$$X_{energy}(k, l) = |X(k, l)|^2 \quad , \quad 1 \leq k \leq \frac{N}{2} \quad (30)$$

其中， $X(k, l)$ 為第 l 幀上，第 k 個頻率的振幅

$h(n)$ 為漢明窗

$S(n, l)$ 為第 l 幀上，第 n 個取樣點的電壓值

N 為頻率數

在本研究中，是根據雷達偵測器的取樣率(256K)來決定時間窗的長度，也就是在一個掃頻周期中，雷達偵測器得到的資料為256點($n=256$)所組成的一組電壓值，因此針對這256點的電壓資料，以長度為256點的漢明窗作為加窗函數 $h(n)$ ，進行訊號疊合，得到的加窗後訊號進行傅立葉轉換即為頻域上的訊號資料 $X(k, l)$ 。

傳統訊號能量計算方法是以能量總值來看，當訊號隨者時間(幀)進行變動時，將每一幀上的所有頻率能量予以加總，以此能量和作為該幀的能量代表，可表示如下：

$$E(l) = \sum_{k=1}^{N/2} X_{energy} \quad (31)$$

其中， $E(l)$ 為第 l 幀的能量值

傳統能量門檻法即是以能量總和來計算每一幀的訊號能量值，之後再以適當的門檻來區別目標訊號與雜訊，但在信噪度低的情況下，這種方法會產生誤差。本研究引入資訊熵的概念來幫助計算訊號的資訊量，同樣在計算得到(30)式的頻域訊號資料後，根據Shannon(1949)提出的資訊熵概念，計算某一幀上的每一個頻率點與該幀的能量總值的比例關係，如(32)式所示，此比例關係相當於在該幀上的頻率點出現機率，因此每對一個幀作一次計算，相當得到該幀上的頻率點分佈資訊，最後再將此機率資訊帶入資訊熵公式 $P \cdot \log\left(\frac{1}{P}\right)$ 以求得每一幀的頻譜熵並作為該幀的訊號能量值。

$$P(i, l) = \frac{X_{energy}(i, l)}{\sum_{k=1}^{N/2} X_{energy}(k, l)} \quad , \quad 1 \leq i \leq \frac{N}{2} \quad (32)$$

其中， $P(i, l)$ 為第 l 幀上，第 i 個頻率對應之機率

$$H(l) = \sum_{n=1}^{N/2} P(i, l) \cdot \log \left[\frac{1}{P(i, l)} \right] \quad (33)$$

為了讓訊號辨識效果更好，本研究採用了 Shen(1998)提出的改良資訊熵方法，以頻帶作為頻譜計算單位，來取代原本以頻率來計算訊號能量的方法，藉由此分帶譜熵來計算訊號能量可以更具抗噪性，具有更好的訊號辨識能力，其計算如下：

$$E_b(m, l) = \sum_{k=1+(m-1)*4}^{1+(m-1)*4+2} X_{energy}(k, l) \quad , \quad 1 \leq m \leq N_b \quad (34)$$

其中， N_b 表示每一幀的頻帶數

$E_b(m, l)$ 表示第 l 幀上的第 m 個頻帶能量

每個頻帶對應之機率

$$P_b(i, l) = \frac{E_b(m, l)}{\sum_{k=1}^{N_b} E_b(k, l)} \quad , \quad 1 \leq m \leq N_b \quad (35)$$

以頻帶計算的訊號譜熵 $H_b(l)$ 可表示成

$$H_b(l) = \sum_{m=1}^{N_b} P_b(m, l) \cdot \log \left[\frac{1}{P_b(m, l)} \right] \quad (36)$$

本研究中以 4 個頻率組成一個頻帶，因此由頻譜分析中的 1~128 個頻率可以組成共 32 個頻帶($N_b=32$)，以這些頻帶來作為譜熵計算的單位，可以降低雜訊對於目標訊號的影響，另外，本研究也加入加權函數，以(18)式的加權分帶譜熵作為訊號能量計算之方法，如此可以更加凸顯目標訊號與雜訊之間的差異。

(2) 門檻設定方法與更新機制

藉由上述的訊號能量定義，可以來計算訊號的能量值來做為設定門檻之依據，本研究是以雜訊作為門檻設定的基準，因為在假設雜訊為彼此獨立的常態分佈，以雜訊的平均數與標準差作為設定門檻的模式，寫成如下：

$$T_{noise} = \mu + \alpha \cdot \sigma \quad (37)$$

其中， μ 為雜訊的譜熵平均數

σ 為雜訊的譜熵標準差

α 為調整係數($\alpha=0.8$)

由(34)式可以得到一門檻值，由該門檻值的計算，可以計算每一幀訊號能量是否超過門檻值的有無來判斷該幀是否為有車的目標訊號，其判斷流程將詳述於4.4節。

因為訊號會隨者時間進行而產生變動，為了能反映出此訊號現象，本研究所設定的門檻值也希望能隨時間改變而進行門檻更新。更新時機選擇在系統判定沒有車存在偵測範圍時，來進行門檻更新，這是為了避免在有車階段進行更新會導致門檻值被不合理拉高，如此將造成門檻值過高所引起的車輛誤判增加。

門檻更新機制如下：

$$\mu_{new} = \beta \cdot \mu + (1 - \beta) \cdot H_b(l) \quad (38)$$

$$\sigma_{new} = \sqrt{|H_{w,mean}^2(l) - \mu_{new}^2|} \quad (39)$$

$$H_{w,mean}^2(l) = \beta \cdot H_{b,mean}^2(l-1) + (1 - \beta) \cdot H_w^2(l) \quad (40)$$

$$H_{w,mean}^2(l-1) = \frac{1}{learning_period} \cdot \sum_{k=1}^{k=learning_period} H_{w,mean}^2(l-k) \quad (41)$$

其中， β 為一常數且 $0 \leq \beta \leq 1$ ($\beta=0.65$)

*learning_period*為學習階段

本研究以影片確定無車的時間作為車輛學習階段，在無車的訊號片段裡選30幀的訊號作為系統學習時間長度，經過此學習階段後，可以得到一門檻初始值，作為車輛訊號偵測的起點。根據門檻更新機制，可以知道只有在非車輛通過期間，門檻值才會進行更新；在車輛通過期間，門檻更新機制會停止而維持上一幀之門檻值，底下圖4.4(a)為一車輛通過之門檻判定圖，其中藍線部分為原始訊號，紅色部份為本研究門檻設定模式所計算出門檻值，由圖可以看出門檻的設定能幫助系統判斷出車輛通過之訊號。

圖 4.4(b)為圖(a)的放大圖，可以明顯看到門檻在平時無車期間會持續更新，但在車輛通過時會停止更新，以避免門檻被不當地拉高。

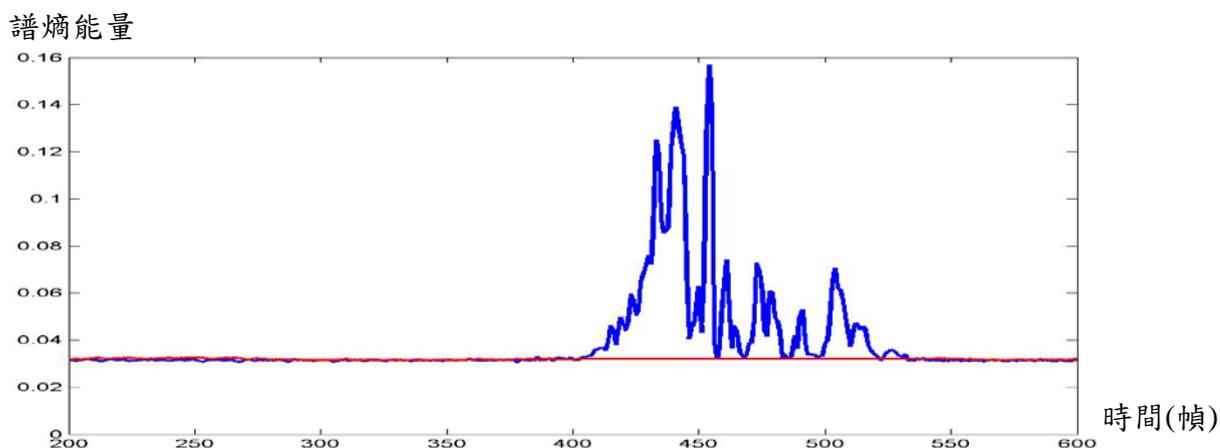


圖 4.4 (a)車輛通過之訊號偵測圖

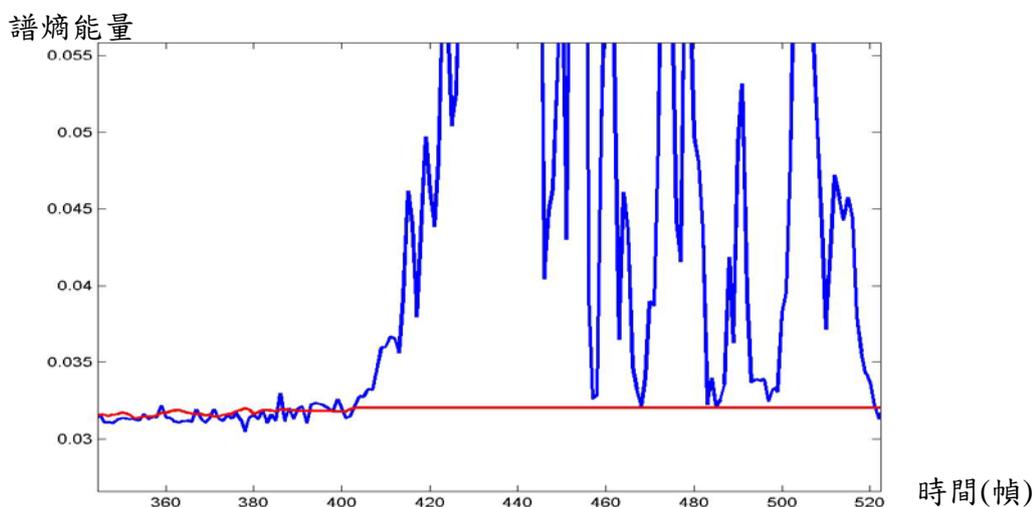


圖 4.4 (b)車輛通過之訊號偵測放大圖

資料來源：本研究整理

4.4 車輛訊號的端點檢測模式

由門檻設定模式決定出門檻值後，便可利用此門檻值進行端點檢測，根據訊號狀態的不同可以把狀態分成三種狀況，分別是無車通過偵測範圍、有車輛存在於偵測範圍與車輛離開偵測範圍，如圖 4.5 所示。在此假設訊號起始狀態為無車階段，計算每一幀的譜熵 H_t 輸入到系統中，經由判斷機制可以得到訊號起始點與結束點的輸出資料。其中 T_{noise} 為根據雜訊設定的門檻值， $Count_b$ 為起始點的計數器， $Count_e$ 為結束點的計數器， Gap 為狀態進行轉移所需的幀數，在本研究其幀數為 10($Gap=10$)。

由圖 4.5 可以將判斷流程描述如下，從無車通過階段作為訊號偵測的起始狀態，當訊號譜熵沒有超過門檻時，則對下一幀進行門檻判斷，若是訊號能量超過門檻，則透過計數器開始計數，直到訊號連續高過門檻次數達到所設定的 Gap，則表示系統偵測到訊號的起始點，訊號狀態轉移到下一個車輛存在狀態。在車輛存在狀態時，若是門檻判斷出訊號能量低於門檻值，則進入車輛離開狀態，同樣需要滿足連續訊號譜熵低於門檻次數達到 Gap，系統才會判定車輛已經離開偵測範圍而決定出結束點，而狀態又回到無車階段；假如在車輛離開狀態時，門檻判斷有訊號能量高於門檻值，則代表車輛還在雷達偵測範圍，狀態會回到車輛存在狀態。

根據此判斷流程，可以對於系統的誤判率作一探討，在假設雜訊符合高斯白噪音分配，

即 $H_{noise}(l) \stackrel{iid}{\sim} N(\mu, \sigma^2)$ ，其中 $H_{noise}(l)$ 為雜訊的譜熵。由本研究系統設定的 $\alpha = 0.8$ 可以推得雜訊能量大於門檻值的機率為

$$P(H_{noise}(l) > \mu + \alpha \cdot \sigma) \approx 0.21 \quad (42)$$

$$\prod_{l=1}^{10} P(H_{noise}(l) > \mu + \alpha \cdot \sigma) \approx 1.82 \times 10^{-7} \quad (43)$$

由(43)式可以看到，在連續 10 次超過門檻值才進入下一個狀態的判斷機制下，雜訊訊號被誤判成目標訊號的機率近似於千萬分之一，對於我們所需要的雷達系統辨識度有足夠的辨識能力。

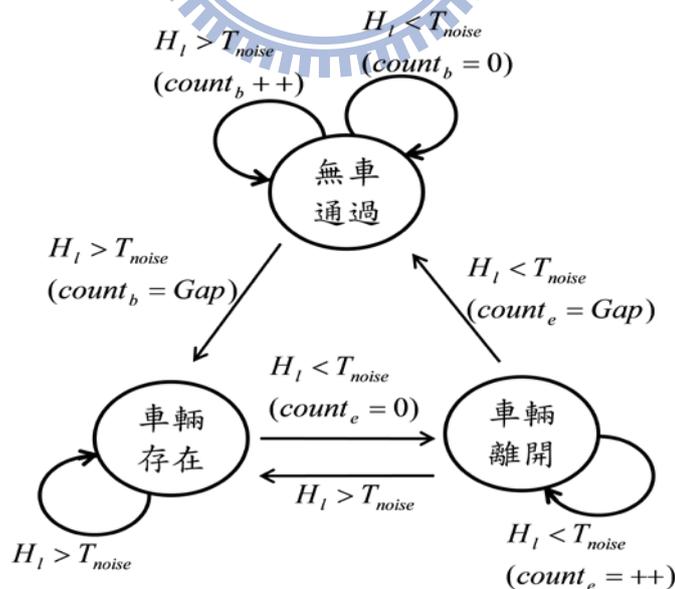


圖 4.5 端點檢測之訊號狀態圖

資料來源：本研究整理

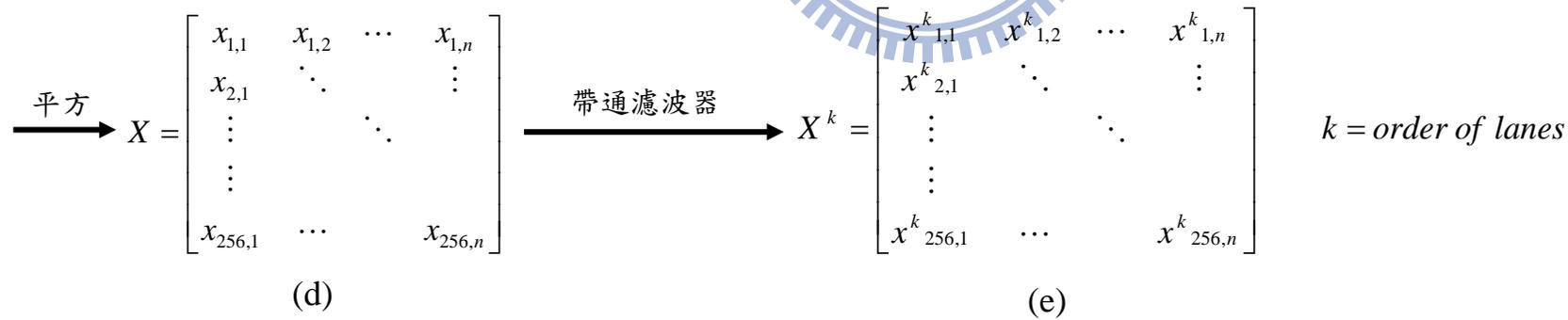
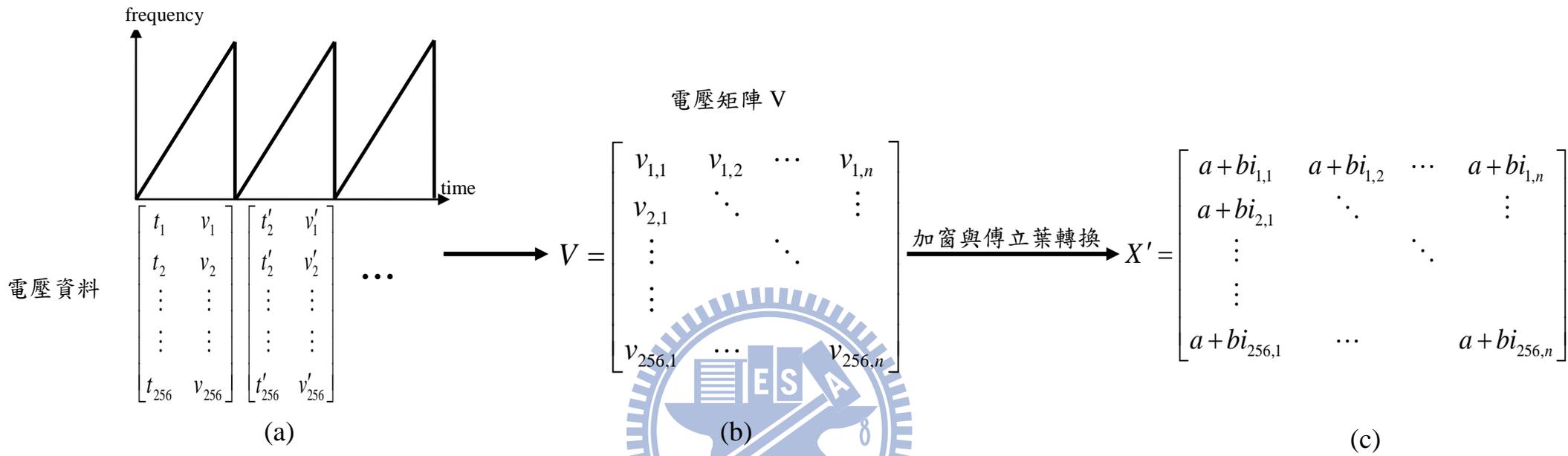
4.5 車輛訊號處理

本研究是透過 FMCW 雷達偵測器來收取資料，得到的原始資料為時間對應的訊號電壓值，其資料形態如下圖(a)，每一個掃頻周期會得到一組電壓值，因為雷達偵測器的取樣率為每秒 256K，所以每一組電壓由 256 個值所組成，因此收取一段訊號後，可以得到一組電壓矩陣 V ，如圖(b)。以(29)式將此電壓矩陣加窗與進行傅立葉轉換，得到頻域上的訊號資料 X' ，如圖(c);由於資料型態為複數形式，為了後續計算方便，取其平方得到圖(d)的 X ，而此時的 X 為雷達偵測器收取訊號的頻域資料矩陣。

本研究假設帶通濾波器的存在，由於雷達偵測器所偵測環境為多車道的道路結構，收取的訊號包含多車道的資訊，以此多車道訊號進行車輛偵測時，會因為車輛能量擴散至隔壁車道或兩車道以上的車輛同時經過所導致的訊號疊合，這些情況將造成車輛偵測誤判。因此透過帶通濾波器的假設，將訊號由多車道訊號轉至單車道訊號，由於從頻率可以推算物體距離車輛偵測器的距離，因此每一個車道可以對應到一頻率範圍，以適當的頻戴濾波器將各車道對應的頻率範圍以外的非雜訊部分予以濾除，即可得到各車道的訊號資料。假設現在第二車道有一輛車通過，可以推得其距離對應之頻率為 $5(f=5)$ ，利用濾波器將原本多車道訊號在頻率 5 以外的非雜訊部分予以過濾掉，如此剩下的訊號部份僅包含第二車道的訊號與雜訊。在本研究使用帶通濾波器對原始多車道訊號(共五車道)進行各車道的訊號過濾，分別可以得到各單一車道所對應的訊號 x^k ，如圖(e)所示，而該帶通濾波器的長度(長度為 1)即為兩兩車道間距所對應的頻率差。

經由帶通濾波器處理後的各車道訊號，包含了目標訊號(車輛雷達回波)、背景訊號(clutter)與雜訊(noise)，因為雷達偵測器在同一環境進行偵測，可以假設背景訊號為固定不變的，根據影片可得到無車階段的訊號，取無車訊號的 30 幀作為門檻學習階段，且該學習階段的第一幀為背景訊號的代表。將各車道訊號扣掉該訊號第一幀的能量值，即可得到僅包含目標訊號與雜訊的車道訊號，如圖(f)所示。

訊號處理後的車道訊號，由(18)式的資訊熵計算可以得到各車道的訊號譜熵 H^k ，如圖(g)。得到訊號譜熵後，藉由本研究的譜熵門檻設定模式可以進行訊號譜熵與門檻值得比較，如果判定訊號低於門檻值則門檻進行更新，繼續下一幀的比較；如果訊號比門檻還高，則進入端點檢測流程將車輛訊號予以辨識出來，而整個車輛訊號辨識流程可用圖 4.7 來表示。



扣掉第一幀

$$X'^k = \begin{bmatrix} x'^k_{1,2} & x'^k_{1,3} & \cdots & x'^k_{1,n} \\ x'^k_{2,2} & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \\ \vdots & & & \\ x'^k_{256,2} & \cdots & & x'^k_{256,n} \end{bmatrix} \quad x'^k_{i,j} = x^k_{i,j} - x^k_{i,1}, i = 1, 2, \dots, 256, j = 2, 3, \dots, n$$

(f)

$$H^k_j = \sum_{i=1}^{256} (-P^k_{i,j} \cdot \log P^k_{i,j}) \rightarrow H^k = [H^k_1 \quad H^k_2 \quad \cdots \quad H^k_n]$$

其中， $P^k_{i,j} = \frac{x^k_{i,j}}{\sum_{i=1}^{256} x^k_{i,j}}$

(g)

圖 4.6 雷達訊號資料型態圖

資料來源：本研究整理

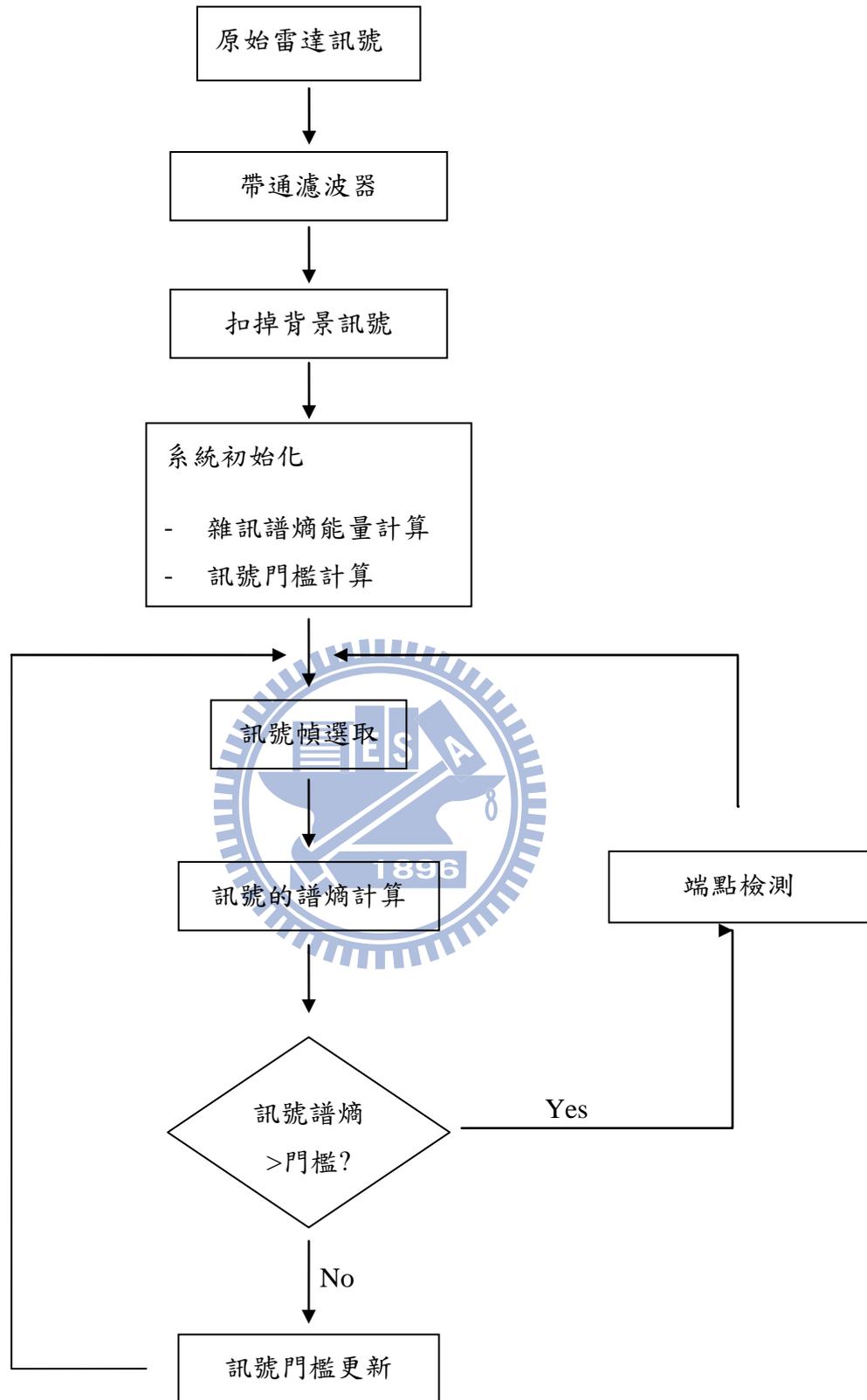


圖 4.7 車輛訊號辨識流程

資料來源：本研究整理

第五章 模式驗證

由以上本研究提出之門檻設定模式與端點檢測流程，可以針對收集的雷達訊號進行有無車訊號的偵測，為了驗證本研究所提出之譜熵門檻辨識效果的確較傳統能量門檻法有更好的車輛辨識能力，底下將分別進行模擬訊號的方法結果比較，以及利用實際雷達偵測器收取之訊號作為實例分析的資料來源。

5.1 雷達訊號模擬

這節介紹以合適的參數來模擬路側 FMCW 雷達訊號，該訊號模擬模型可以產生具有真實訊號的散射效果，以產生符合實際訊號特性的模擬訊號。我們所收到雷達訊號一般包含目標訊號(車輛雷達回波)、背景訊號(clutter)與雜訊(noise)，在此僅針對目標訊號與雜訊兩者進行訊號模擬。

車輛進到雷達偵測範圍再出到偵測範圍外的過程，可表示如圖 5.1。當模擬車輛從進入雷達偵測範圍到離開偵測範圍的過程中，會產生一組車輛位置對應的距離集合 $\{d_t, t = -n, \dots, 0, \dots, n\}$ 。其中 d_0 為雷達偵測器與偵測範圍中間位置的距離， d_{-n} 為模擬車輛在起始偵測範圍位置到雷達偵測器的距離，同理， d_n 為模擬車輛在結束偵測範圍位置到偵測器的距離， θ 為模擬車輛位置與偵測中點的夾角。

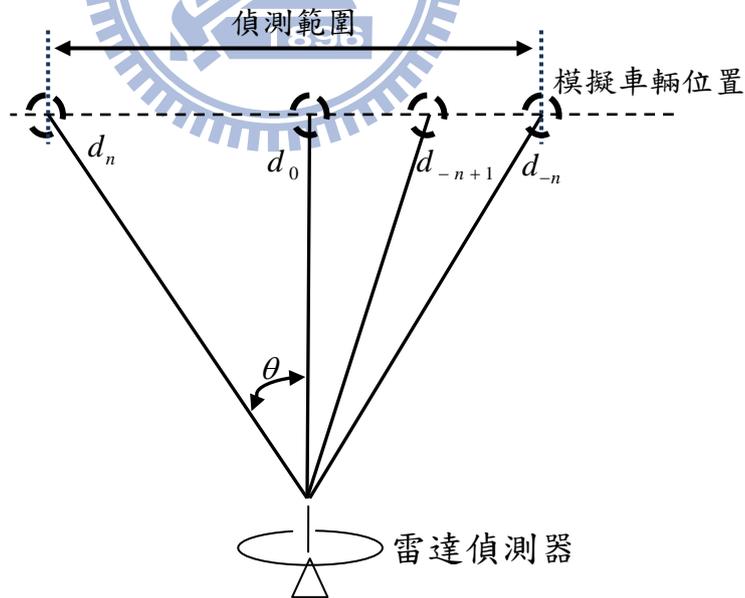


圖 5.1 模擬訊號示意圖

資料來源：本研究整理

根據雷達偵測原理，車輛的雷達回波資訊包含在中頻訊號中，根據訊號處理原理[18]，可以用數學型式來表達中頻訊號如下：

$$y_t = A_t \cos(2\pi f_0 t + \varphi) \quad (44)$$

其中， A_t 為時間 t 時的振幅

φ 為時間 t 時的相位角

f_0 為訊號的中頻頻率

根據雷達訊號公式：

$$A = \frac{P \cdot G_T^2 \cdot \lambda^2 \cdot \delta}{(4\pi)^2 \cdot R^4 \cdot L} \quad (45)$$

其中， A 為訊號振幅

P 為偵測器發射功率

G_T 為偵測器天線增益比

λ 為發射雷達波波長

R 為物體距天線距離

δ 為雷達目標有效截面積

L 為系統損耗



可以推得 $A \propto G_T^2 \cdot \delta \cdot R^{-4}$ ，代表收到的雷達回波振幅與物體的雷達反射面積成正比，與距離的四次方成反比，與天線增益比平方成正比。

在此模擬訊號中，假設都是同一台車通過，且偵測器系統穩定不變，因此訊號振幅主要和車輛距離雷達偵測器遠近有關，並可由雷達偵測角度得到一組對應到各時間點的距離 $\{d_t, t = -n, \dots, 0, \dots, n\}$ 。(39)式中的中頻頻率 f_0 與目標距離、脈衝重複頻率 (Pulse Recurrence Frequency, PRF)、掃頻時間與訊號頻寬有關，

$$\frac{f_0}{\Delta t} = \frac{\Delta F}{\Delta T}$$

$$\Rightarrow f_0 = \frac{\Delta F}{\Delta T} \cdot \Delta t = \frac{2d \cdot PRF \cdot \Delta F}{c}$$

$$\Rightarrow f_t = \frac{f_0}{PRF} \quad (46)$$

(46)式中的相位角 φ 可以表示成 $\Delta\varphi_t = \Delta d_t \cdot \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)$

雜訊模擬則建立在高斯白噪音的假設下，可表示成 $\varepsilon_t \sim N(0, \sigma^2)$ ，其中 σ 的變動可用來改變模擬訊號的信噪比。

綜合以上推導，可以得到模擬訊號 y_t 表示如下：

$$y_t = A_t \cos(2\pi f_0 t + \varphi_t) + \varepsilon_t \quad (47)$$

對於每一次掃頻所得到的模擬訊號則可改如下：

$$y_{t,j} = A_t \cos(2\pi f_t j + \varphi_t) + \varepsilon_{t,j}, \quad j = 1, \dots, N \quad (48)$$

其中， N 為每一次掃頻的取樣點數

f_t 為每一次掃頻的中頻頻率

(47)式表示收到的訊號包含目標訊號與雜訊，目標訊號由模擬車輛在偵測範圍內的各點的反射波所組成，而雜訊則假設符合常態分配且各自獨立，以此我們可以模擬出車輛通過產生的雷達回波訊號，如圖 5.2，圖中模擬訊號高起的部分為車輛通過偵測範圍的片段，可以得知車輛通過偵測範圍時，此模型會產生類似真實訊號能量變強的現象，符合以門檻法來偵測車輛的條件。

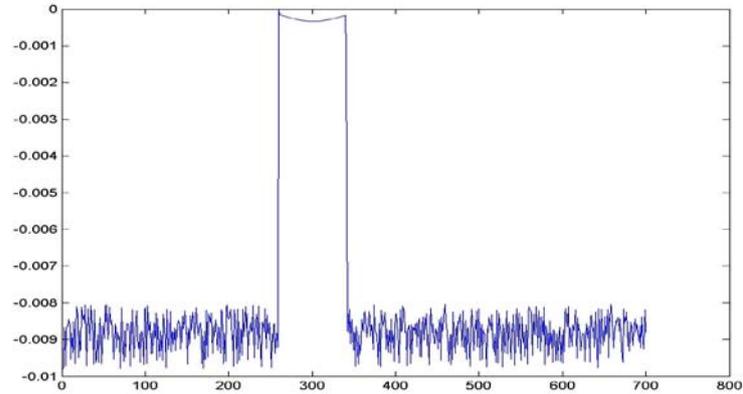
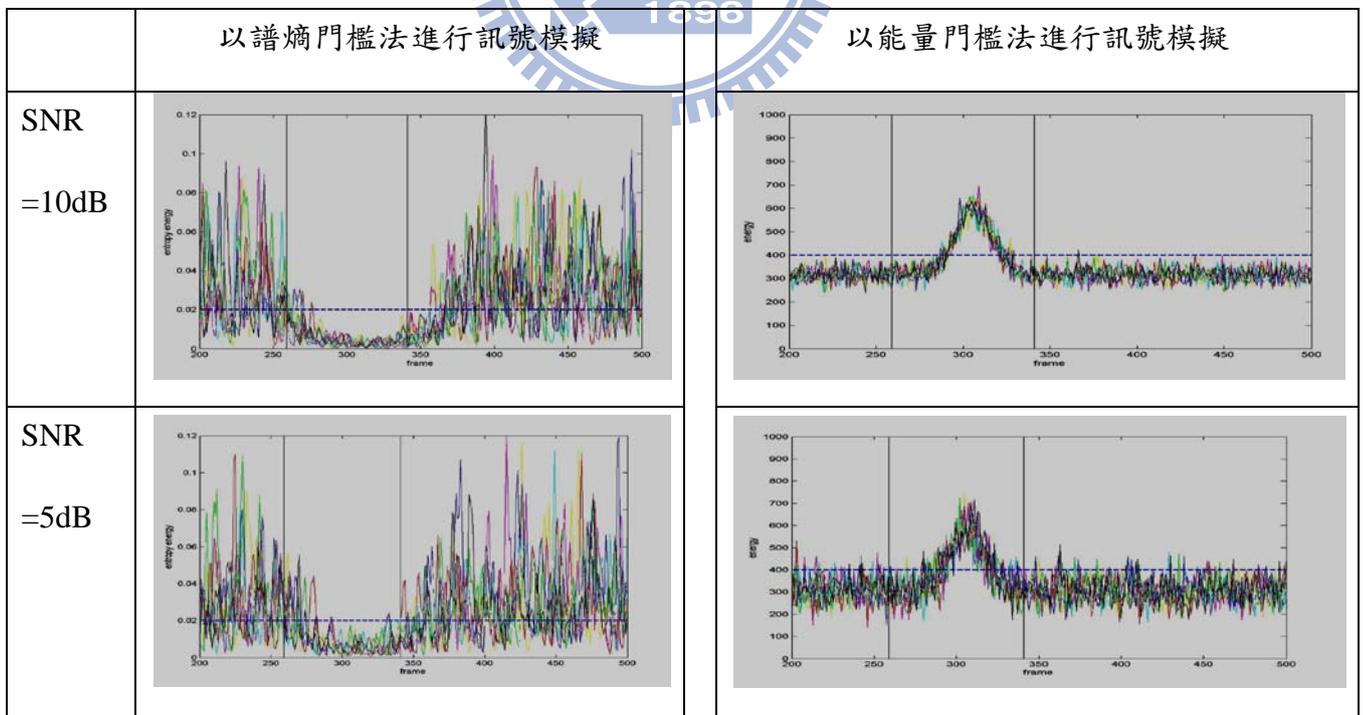


圖 5.2 模擬訊號波型圖(25db)

資料來源：本研究整理

5.2 模擬結果

根據 5.1 節所建立的模擬訊號公式，我們可依不同的信噪度來產生模擬訊號，以提供本研究之方法與傳統能量方法辨識。圖 5.3 為訊號模擬圖，在假設 $d_0=15$ 公尺，車速以每秒 15 公尺通過，分別針對 1dB、5dB、10dB 三種不同的信噪度來產生訊號，車輛通過雷達偵測範圍中心為第 300 幀，有效偵測範圍為第 259 幀到第 341 幀，每一組信噪度皆產生 500 次的訊號且每次產生之訊號由不同的顏色繪製。



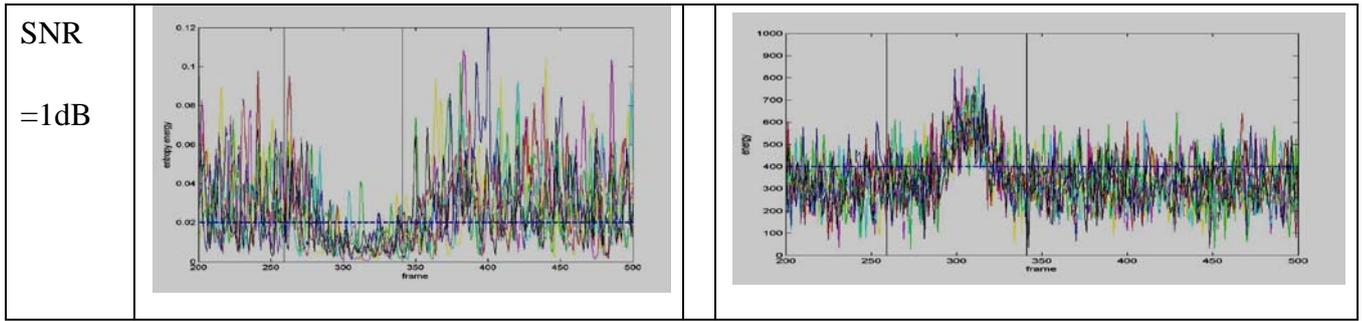


圖 5.3 不同信噪度下的波形圖

資料來源：本研究整理

圖 5.3 中的黑色垂直線為模擬訊號時，偵測器的有效偵測範圍，由圖形可以看到，隨著信噪度逐近下降，雜訊變動程度漸大，對於目標訊號的判定影響也越大，可以看到目標訊號有逐漸隱藏在雜訊之中的趨勢。利用(48)式模擬訊號後，經由端點檢測流程分別對本研究方法與傳統能量門檻法進行車輛偵測，其辨識率成功結果整理於表 5.1。

表 5.1 各信噪度下之訊號辨識成功率

方法 \ 信噪度	方法	
	本研究方法	傳統能量方法
10dB	98.4%	97%
5dB	93.6%	90.8%
1dB	87.4%	80.2%

實驗的數值結果可以看出，信噪度下降的過程中，車輛訊號的辨識成功率會變小，但不管在哪一個信噪度實驗下，本研究方法均比傳統能量方法有更高的辨識成功率。且隨者信噪度越低，本研究之辨識成功率與傳統能量方法的成功辨識率的差越大，因此可以推論在低信噪度的環境下，本研究方法比傳統方法有更好的訊號辨識能力。而此現象推測是因為低信噪度環境下，目標訊號與雜訊之能量差異較小，以傳統能量門檻法來偵測有無車輛通過，其誤差出自於將目標訊號誤判成雜訊，本來有車輛通過被誤判成無車輛通過，導致整體辨識度下降。同樣在信噪度降低的過程，由於有車通過訊號與無車通過的雜訊兩者的訊號分配型態不相同，以資訊熵來建立門檻判斷的本研究方法，在計算熵時，由於隱含著有車通過的訊號分配型態，多了此資訊的本研究方

法，即使在訊號能量與背景雜訊差異較小的情況下，也能有較好的車輛訊號辨識結果。

5.3 實例分析

由 5.2 節的模擬訊號辨識結果得知，本研究提出的譜熵門檻辨識法較傳統能量辨識法擁有更好的辨識能力，這一節將以實際雷達收取之訊號資料，以本研究方法與傳統能量門檻法進行辨識結果比較。以下將針對雷達收取訊號的地理環境與軟體程式作介紹，並說明訊號資料的處理過程，將實際雷達訊號資料以端點檢測模式進行訊號偵測，並與實際車輛通過情形比對，進行辨識率分析。

5.3.1 偵測環境介紹

本研究分析之訊號為 2009 年實際道路量測之數據，因為訊號辨識演算法須符合多車道偵測之目標，其環境選取須符合多車道，可裝置側向微波雷達偵測器等條件，地點選定公道五路台肥公司附近路段，該地區之地理環境如圖 5.4 所示。

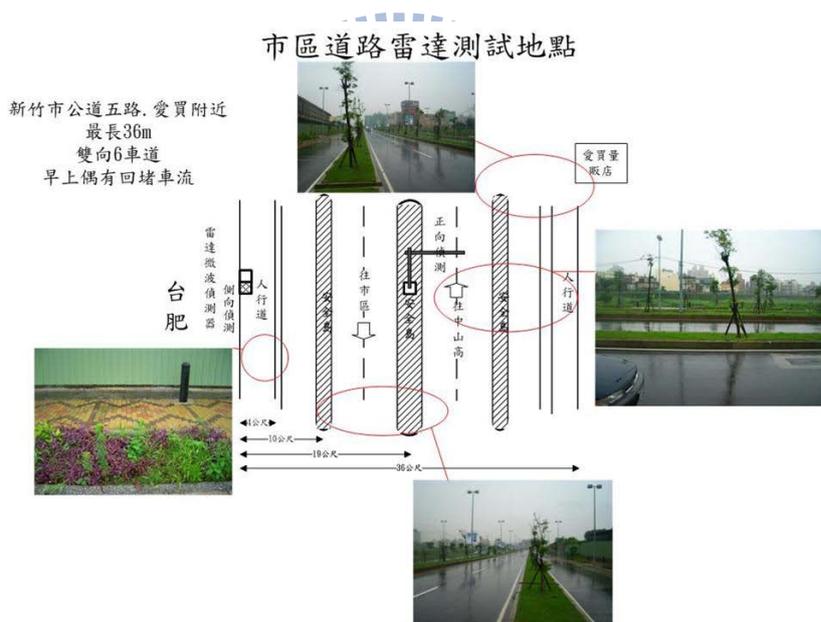


圖 5.4 雷達偵測環境圖(公道五路)

資料來源：[31]

本資料蒐集地點位於公道五路台肥公司附近，道路兩旁各有人行道，道路中央有三處分隔島，為一雙向六車道之車流環境，由圖 5.5 可看到偵測器涵蓋範圍共包含了六個車道，但由於路測設備的限制，實際偵測範圍為第二車道到第六車道。



圖 5.5 車輛偵測影像畫面(公道五路)

資料來源：本研究整理

5.3.2 偵測器軟體

微波雷達偵測器蒐集完資料後，本研究透過 DSP 與 LabVIEW 軟體將訊號由偵測器擷取到 PC 以供後續分析使用。LabVIEW 為 Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench 的簡稱，由美商國家儀器公司所開發之圖形化程式語言，採用圖形化設計的元件概念，因此開發程式較易著手，另外，它已內建資料擷取、資料分析、影像呈現等功能，對於量測後的數據分析與顯示有相當好的效果。透過使用資料擷取卡(DAQ 卡)將偵測器所收取之訊號傳輸到電腦中，取代了以往訊號分析所需之示波器及訊號產生器，如圖 5.6 所示。

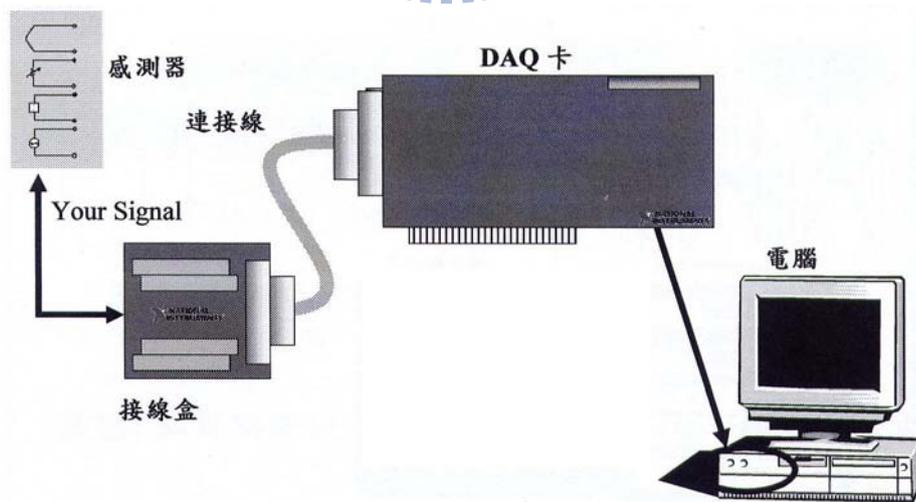


圖 5.6 使用 DAQ 卡進行資料擷取

資料來源：[31]

在本研究中，使用 LabVIEW 作為雷達訊號擷取工具，利用該程式將 DSP 轉到電腦的數位訊號資料進行 FFT 運算、即時交通資訊演算法來產生即時資訊，並於電腦螢幕中顯示。程式進行時會同時執行兩個動作：抓取偵測時間，以及擷取卡所得到的訊號資料，將取得之訊號資料分別加以記錄與進行快速傅立葉轉換，將時間序列資料轉換至頻率序列資料，再根據後續演算法需要進行分析，下圖 5.7 為實際操作之畫面，於畫面左半部分別顯示出訊號在頻域之頻譜圖，而右方則會顯示該時間點所對應的實際道路影像之畫格。



圖 5.7 LabView 軟體介面

資料來源：本研究整理

以下為偵測器系統重要參數，利用這些參數可計算取樣頻率與取樣點數，透過快速傅立葉轉換，由頻譜計算出偵測物體距離偵測器之距離，進而辨識車輛所在位置。

表 5.2 雷達偵測器之參數與特性

Waveform	Linear FMCW, Triangular
Transmitted power	50mw
RF Frequency	10.525GHz
Signal Processing	256 Range FFT
A/D Sampling Rate	256KHz
Radar Detect	Side-looking
Radar Height	6.5m

Modulation Cycle	1000Hz
Modulation Slope	50MHz/ms
Beam width	3°
Range resolution	1m
Wave Length	0.0285m

5.4 實例分析結果

車輛通過的判斷正確與否，取決於能否精準地判斷車輛通過所造成的訊號變化片段。在假設已知雷達偵測器與各車道間距離，由傅立葉轉換可以得知，第幾個車道落在多少的頻率範圍內，其算法如下(以第二車道為例)：

已知每一車道寬約為 3 公尺，由圖 5.1 可知，第二車道距離雷達偵測器約為 13 公尺(水平距離)，雷達偵測器架設高度為 6.5 公尺，因此我們可以計算得到雷達偵測器與車道直接距離為 14.534，如圖 5.8 所示。

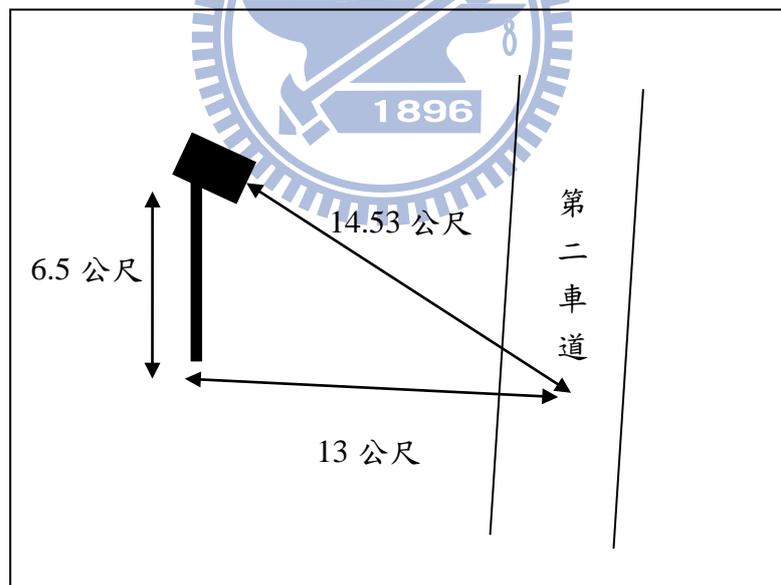


圖 5.8 偵測環境示意圖

資料來源：本研究整理

根據雷達偵測器規格可以得知，掃頻速度為每秒 1000 個周期，頻率變化大小為 50MHz，由距離 14.53 公尺可推算花了 9.6896×10^{-8} 秒 ($\Delta t = \frac{2 \cdot \Delta d}{C}$ ，C 為光速)，再代入雷達的三角波中，可得到在頻域下，第二車道所對應的頻率約為 5。

同理，將各車道所對應之頻率整理至下表。

表 5.3 車道對應之頻率

車道	頻率
第二車道	f=5
第三車道	f=6
第四車道	f=7
第五車道	f=8
第六車道	f=9

知道各車道所代表的頻率範圍之後，可將頻域上的雷達訊號依照各頻率大小，分別進行端點檢測。在每個車道頻率範圍中，各頻率以本研究的分帶譜熵方法計算訊號能量，依此可設定各自的能量強度門檻，當一小段連續時間之訊號皆大於該頻率對應之能量強度門檻時，則系統可判斷有車輛通過。

實驗一開始以偵測器收取的實際雷達訊號進行資料處理，因為偵測器的取樣率為 256K，所以訊號可以整理成數組的電壓資料，每一組為 256 個電壓值所組成，經過資料整理成一個電壓矩陣後，以長度為 256 點的漢明窗對此電壓矩陣進行加窗化，並將此加窗資料以傅立葉公式轉換成頻域訊號。

由於車輛的雷達反射訊號具有擴散性，如一輛大車在第三車道上駛過雷達偵測器範圍時，其造成的反射訊號並非單純只落在該車道之頻率範圍上，可能同時第二、三、四車道皆有反射訊號，但由實驗觀察可以得知，在某車道之通過車輛造成的反射訊號，其能量會擴散至隔壁車道(頻率)，但該反射訊號最強的能量值仍會落在該車輛通過所對應之車道(頻率)。假設帶通濾波器的存在，可將含多車道資訊的頻域訊號轉為單一車道的頻域訊號，如此可以去除訊號能量擴散到隔壁車道之問題，避免能量擴散造成的誤判現象。得到的單一車道頻域訊號，包含了車輛訊號、雜訊與背景訊號，假設背

景訊號為固定不變的條件下，以門檻學習階段的第一幀作為背景訊號的代表，並將各車道的訊號扣掉第一幀後，剩下目標訊號與雜訊。之後以本研究提出之譜熵計算方法，得到各車道的訊號能量代入(37)式中，其中 α 取 0.8，得到一門檻值並且此門檻值會隨者時間變動而進行更新，而更新參數 β 取 0.65。藉由此門檻便可進行訊號辨識，比較每幀的訊號譜熵與門檻值，若是訊號比門檻低則進行下一幀的比較；反之，若是訊號比門檻高，則透過端點檢測流程將訊號辨識出來。

表 5.4 各車道之車輛數判斷成功準確率

判別方法	本研究之譜熵門檻法		
車道	實際車輛總數	判斷車輛總數	車輛總數準確率
2	40	39	97.50%
3	45	42	93.33%
4	31	27	87.10%
5	30	25	83.33%
6	14	11	78.57%
			87.97%
判別方法	傳統能量門檻法		
車道	實際車輛總數	判斷車輛總數	車輛總數準確率
2	40	37	92.50%
3	45	41	91.11%
4	31	26	83.87%
5	30	22	73.33%
6	14	9	64.29%
			81.02%

經過車輛訊號辨識流程得到的辨識結果將與實際交通影片進行比對，求得的各車道之車輛數準確率整理至表 5.4，由訊號辨識結果可以看出，本研究之有無車判斷演算法，具有相當程度的準度，而系統判斷車輛數會比實際車輛數還少，原因在於更新完的門檻值會因為某些車的反射訊號較小而沒有偵測到車輛通過；而以本研究之方法與傳統能量判別方法主要差異在第五、六車道，推測是因為第五、六車道距偵測器較遠，車輛通過時所造成的雷達回波能量相對較小，在同樣的端點檢測機制下，車輛回波訊號與雜訊差異較小的情況時，能量門檻辨識能力比本研究之方法效果較為不彰，此結果與訊號模擬辨識結果相同，本研究提出的譜熵門檻法有更好的辨識結果，且在越低信噪度的環境下，其辨識成功率相對於傳統能量門檻法有越好的辨識能力。



第六章 結論與建議

6.1 結論

現行的車輛偵測方法主要透過訊號能量的大小作為設定門檻基準，傳統計算訊號能量的方法是以每一個時間點(幀)上的頻譜能量總和作為每幀的能量值，以這種能量計算方法得到的門檻值，在目標(車輛)訊號與雜訊的能量相差大時，可以辨識出車輛訊號，但在實際車輛偵測時候，常會有目標訊號能量與雜訊相差不大的情況。為了在這種情況下，系統仍有準確的車輛偵測能力，本研究使用譜熵方法來計算訊號能量，由此決定門檻設定機制與端點檢測模式進行車輛偵測。本研究結果整理如下：

- (1) 在模擬訊號實驗中，不論在哪一個信噪度下，本研究所提出之方法與傳統能量門檻法相比，其訊號辨識結果皆較為準確，且在越低信噪度的環境，兩個方法的準確度差異越大。
- (2) 以雷達偵測實際收取資料來進行訊號偵測實驗，由實驗結果發現，距離雷達偵測器較近的車道(如第二、三與四車道)，本研究的譜熵門檻辨識結果與能量門檻辨識結果相比，本研究之方法分別以 97.50%、93.33%、87.10%略優於能量門檻方法，辨識準確率差約在 5% 以內。
- (3) 而距離較遠的車道(如第五、六車道)，根據實驗結果可以明顯看到本研究的辨識結果優於能量門檻辨識結果，其辨識準確率分別差 10.00% 與 14.29%。
- (4) 推測本研究之譜熵門檻法因為採用資訊熵的概念，在計算每一幀的訊號能量時，同時包含了該幀上的譜熵分布與整個幀的能量大小，相較於傳統能量門檻單純考慮幀上的能量總和，本研究方法擁有較多的訊號資訊，在目標訊號與雜訊差異小的情況下，本研究方法提供車輛偵測的資訊較多，因此準確度也較高。

6.2 建議

本研究建議整理如下：

- (1) 由於目前沒有論文以譜熵門檻檢測法應用於雷達偵測器的車輛有無辨識，故本研究目前對於參數的設定，如 α 、 β 值，主要以使用的雷達偵測器訊號特性做設定，未來可以進一步研究，如使用訊號誤判率或最小平方法來決定這些參數。
- (2) 本研究目前沒有把帶通濾波器設計納入演算法中，因此在後續研究若加入帶通濾波器設計，可以針對雷達偵測器的特性，設計合適的濾波器函數，有助於增加偵測器的辨識能力。

- (3) 對於背景訊號的設定，是以無車階段的學習期間，以第一幀作為背景訊號值，經由訊號處理過程予以扣除，後續研究可以根據端點檢測的結果來對於針對背景訊號進行更新，以更符合道路情形變化。
- (4) 以本研究方法可以更準確地判斷出有無車輛通過雷達偵測範圍，且根據實驗過程可以發現大、小型車輛的譜熵有所差異，未來可針對車種進行辨識，更進一步提升系統辨識能力。



參考文獻

- [1] Bullington, K. and J. M., Fraser, "Engineering aspects of TASI", Bell System Technical Journal, pp.353-364, March 1959.
- [2] EIS Inc., "RTMS User Manual", *EIS Electronic Integrated Systems Inc.*, 2002.
- [3] Fast, J. D., "Entropy, the significance of the concept of entropy and its application in science and technology", Macmillan, 1982.
- [4] Genderen, P., "Feature based plot classification using a Bayes algorithm", Proceedings of the 3rd European Radar Conference, pp. 41-44, 2006.
- [5] Guo, Q., N. Li, and G. Ji, "A improved dual-threshold speech endpoint detection algorithm", ICCAE Computer and Automation Engineering, 2010.
- [6] Haigh, J. A. and J. S. Mason, "Robust voice activity detection using cepstral features", IEEE Computer, Communication, Control and Power Engineering conference, 1993.
- [7] Hussain, A., S.A. Samad and L.B. Fath, "Endpoint detection of speech signal using Neural Network", IEEE Trans on ASSP, pp.271-274, 2000.
- [8] Jaynes, E.T., Information Theory and Statistical Mechanics II, Physical review, 1957.
- [9] Jou, Y.J. and Y.K. Chen, "The online vehicle type classifier design for road-side radar detectors", AIP Conference Proceedings, vol. 1148, Issue 1, pp.462-465, 2009.
- [10] Junqua, J.C., M. Brian and R. Ben, "A robust algorithm for word boundary detection in the presence of noise", IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, vol. 2, no. 3, 1994.
- [11] Lamel, F., R. Rabiner and E. Rosenberg, "An improved endpoint detector for isolated word recognition", IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, vol. 29, no. 4, 1981.
- [12] Leduc, G., "Road traffic data collection methods and application", Working papers on Energy, Transport and Climate Change N.1, 2008.
- [13] Leung, S. W. and J. W. Minett, "A fuzzy shadow feature scheme for radar signal detection", International Conference of Information, Communication and Signal Processing, vol. 3, pp.1386-1388, 1997.
- [14] Li, Y., Y. Fan, "A novel algorithm to robust speech endpoint detection in noisy environments", IEEE Industrial Electronics and Application, 2007.

- [15] Li , Q., J. Zheng and A. Tsai, "Robust endpoint detection and energy normalization for real-time speech and speaker recognition," IEEE Transactions on speech and audio processing, vol.10, No.6, March 2002.
- [16] Lin, C.T., G.D. Wu, "A robust word boundary detection algorithm for variable noise-level environment in cars", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol.3, No.1, March 2002.
- [17] Malboubi, M., J. Akhlaghi, and M. Saraf, " The intelligent identification of air and sea targets in coastal radars", Proceedings of the 3rd European Radar Conference, pp. 17-20, 2006.
- [18] McClellan , J. H., R. W. Schafer and M. A. Yoder, Signal Processing First, Pearson Prentice Hall, 2003.
- [19] Musch, T., "A high precision 24 GHz FMCW-radar using a phase-slope signal processing algorithm", Proceedings of the 32nd European Microwave Conference, pp. 1-4, 2002.
- [20] Ney, H., "An optimization algorithm for determining the endpoints of isolated utterances", IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, vol. 6, pp.720-723, 1981.
- [21] Rabiner, R. and R. Sambur, "Voiced-unvoiced-silence detection using the Itakura LPC distance measure", IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, vol. 2, pp.323-326, 1997.
- [22] Shannon, C.E., "A mathematical theory of communication", University of Illinois Press, Urbana, 1949.
- [23] Shen, J.L., J.W. Hung and L.S. Lee, "Robust entropy-based endpoint detection for speech recognition in noisy environments", presented at the ICSLP, 1998.
- [24] Stove, A.G., "Linear FMCW radar techniques", IEEE Proceedings of Radar and Signal Processing, vol. 139, no. 5, pp. 343-350, 1992.
- [25] Wu, B.F. and K. C. Wang, "Robust endpoint detection algorithm based on the adaptive band-partitioning spectral entropy in adverse environments", IEEE Transactions on speech and audio processing, vol.13, No.5, March 2005.
- [26] Wu , G.D. and C.T. Lin, "Word boundary detection with mel-scale frequency bank in noise environment", IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, vol. 8, no. 5, 2000.

- [27] Zhang, H., W. Yu and X. Sun, "A novel method for background suppression in millimeter-wave traffic radar sensor", Proceeding of the 11th International IEEE Conference in Intelligent Transportation Systems, pp. 699-704, 2008.
- [28] Zhang, S., J. Fan, L. Shou and J. Dong, "A detection method of radar signal by wavelet transforms", Fuzzy Systems and Knowledge Discovery Forth International Conference, vol. 2, pp.710-714, 2007.
- [29] 交通部統計處 - 97年重要交通統計指標分析，2009。
- [30] 林大傑，車輛偵測器不完整資訊推估旅行時間之研究，逢甲大學交通工程與管理所，碩士論文，民96。
- [31] 卓訓榮等，「自動化路況資訊偵測系統研發與示範(一)」，交通部運輸研究所委託，民96。

