

國立臺灣大學電機資訊學院電信工程學研究所



碩士論文

Graduate Institute of Communication Engineering  
College of Electrical Engineering and Computer Science  
National Taiwan University  
Master's Thesis

使用里德-所羅門碼結合交錯器於無人機藍牙廣播之模擬分析

與應用最佳化

Simulative Analysis and Application Optimization of Interleaved  
Reed-Solomon Code in UAV Bluetooth Broadcasting

施伯謙  
Po-Yen Shih

指導教授：吳瑞北 博士

Advisor: Ruey-Beei Wu, Ph.D.

共同指導教授：賴怡吉 博士  
Co-Advisor: Alexander I-Chi Lai, Ph.D.

中華民國 114 年 7 月

July, 2025

# 誌謝



自從逕讀博士班到降轉回碩士班，這幾年，載浮載沉，在研究所的日子裡，苦憂參半。好幾次，我都覺得自己撐不下去，差點要放棄。是吳瑞北教授與賴怡吉教授拉住了我。

還記得第一次踏入吳老師的辦公室，我的内心忐忑不安，深怕被原指導教授放棄的我，再次遭到拒絕。是吳老師義正嚴辭地說著：「既然我們把學生收進來，就要負責教導他，怎能不給學生機會呢？」是賴老師正氣凜然地說著：「相逢即是有緣，今天你我有緣相遇一場，只要拿文件來，我一定簽字！」

進入吳老師的實驗室後，承蒙兩位老師的不嫌棄，給予我擔任物聯網系列課程助教的機會，透過每週的實驗室會議與課程討論，讓我逐漸融入實驗室的研究環境，也一步步琢磨出本篇論文的主題與架構。

能順利完成這篇論文，特別感謝我的指導教授吳瑞北老師與賴怡吉老師的悉心指導，以及口試委員張時中老師、林茂昭老師與蔡坤諭老師的寶貴建議。此外，也要感謝所辦的趙文瑛趙姐、心輔室的盧怡蒨心理師，因為有你們的陪伴與支持，我才能走過這段漫長的歷程。感謝實驗室的品翔、秉澤、嘉倫與佳灝，在實驗室有你們的陪伴，讓我從未感到孤單。

最後，最深的感謝獻給我的家人們，謝謝你們願意成為我永遠的避風港，陪我走過這段艱辛旅程。我愛你們！

## 中文摘要



無人機在空中飛行時，會需要向外界進行包含其身份資訊、位置座標、飛行速度以及重要機敏資訊的廣播通訊。然而由於現實環境中存在著許多物理上的接收障礙，導致地面端在進行通訊接收時，會出現無法順利收到由無人機所發送出來的廣播通訊之情況。

本研究為了解決上述問題，提出了一套針對現實環境的圖資進行自動化取樣的流程方法，並針對台北市的圖資進行建築物的數據分析，以得出現實環境中存在的物理障礙物之分佈，並於此建築物真實分佈之數據集當中進行數值模擬，進而得出針對不同地區與高度的環境特徵。

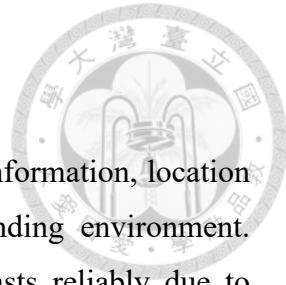
本研究探討了在使用低功耗藍牙( BLE, Bluetooth Low Energy )的廣播系統中，加入串聯碼( Concatenated Code )的設計，透過兩組里德-所羅門碼 ( Reed-Solomon Code ) 以及交錯器 ( Interleaver ) 的整合，以處理在藍牙廣播通訊的過程中，出現叢發性錯誤 ( Burst Error ) 而導致資訊丟失的情況，並藉由真實世界圖資及數值模擬的方式，得出針對特定環境特徵相對應的推薦編碼參數組。

本研究成果為在給定真實的地圖資料後，能夠透過自動化框架進行建模，以取得該區域之隨機航線的建築物遮蔽數據，並且針對該區域與特定高度給出相對應的推薦編碼參數。最後以台北市大安區及萬華區進行模擬設計，計算結果顯示在建築阻擋率較高(12.85%)的大安區，其訊息接收成功率可以由 25.55% 提高到 88.05%，而在阻擋率較低(6.38%)的萬華區，成功率也可以由 50.5% 提高到 94.45%。



關鍵字：無人機、無人機系統識別機制、無人機系統、無人機系統交通管理、里德  
-所羅門碼、交錯碼、藍牙、低功耗藍牙、藍牙廣播

# ABSTRACT



When drones fly in the air, they must broadcast their identity information, location coordinates, flight speed, and other sensitive data to the surrounding environment. However, ground receivers may struggle to receive these broadcasts reliably due to various physical obstacles in real-world environments.

To address this issue, this paper proposes an automated sampling process for real-world geographic data. This process is used to analyze the building data of Taipei City to determine the distribution of physical obstacles. Numerical simulations are then performed on this real-world building distribution dataset to derive geographical characteristics for different regions and altitudes.

Furthermore, this research investigates the integration of a Concatenated Code design into Bluetooth Low Energy (BLE) broadcast systems. This design combines two Reed-Solomon (RS) codes with an Interleaver to handle burst errors that lead to information loss during communication. By leveraging real-world map data and numerical simulations, this study derives corresponding recommended coding parameter sets for specific geological characteristics.

The contribution of this research is an automated framework that, given real map data, can model the environment to obtain building obstruction data for random flight paths within the area. Based on this data, the framework provides corresponding recommended coding parameters for a specific area and flight altitude.

In simulations conducted for Taipei's Daan and Wanhua districts, the proposed scheme markedly improved reliability. The results show that in Daan District, which has a higher building blockage ratio (12.85%), the message reception success rate increased from 25.55% to 88.05%. Meanwhile, in Wanhua District, which has a lower building blockage ratio (6.38%), the message reception success rate also improved from 50.5% to 94.45%.

*Keywords:* *Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Remote Identification (Remote ID), Unmanned Aerial System (UAS), UAS Traffic Management (UTM), Reed-Solomon Code, Interleaving Code, Bluetooth, Bluetooth Low Energy, Bluetooth Advertising*

# 目次



誌謝 .....	i
中文摘要 .....	ii
ABSTRACT .....	iv
目次 .....	v
圖次 .....	viii
表次 .....	xi
<b>Chapter 1 緒論.....</b>	<b>1</b>
1.1 研究動機 .....	1
1.2 問題表述 .....	2
1.3 主要貢獻 .....	5
1.4 章節內容概述 .....	6
<b>Chapter 2 文獻探討.....</b>	<b>8</b>
2.1 藍牙 (Bluetooth).....	8
2.1.1 低功耗藍牙 (Bluetooth Low Energy).....	10
2.1.2 藍牙錯誤更正機制 .....	13



2.1.3 藍牙穩健性 .....	14
2.2 無人機交通管理 ( UAS Traffic Management ) .....	15
2.2.1 無人機系統交通管理 .....	16
2.2.2 無人機射頻辨識機制 ( Remote Identification ) .....	17
2.2.3 無人機近期資安研究 .....	19
2.3 通道編碼 ( Channel Coding ) .....	20
2.3.1 抹除碼 ( Erasure Code ) .....	20
2.3.2 里德-所羅門碼 ( Reed-Solomon Code) .....	20
2.3.3 交錯碼 ( Interleaving Code ) .....	22
2.3.4 串聯碼 ( Concatenated Code ) .....	24
<b>Chapter 3 研究方法.....</b>	<b>26</b>
3.1 都會區建物資料 .....	28
3.1.1 原始資料來源.....	28
3.1.2 QGIS 分析流程 .....	28
3.2 城市障礙模型分析 .....	31
3.3 流程設計 .....	35



<b>Chapter 4 編碼應用與模擬.....</b>	<b>44</b>
4.1 藍牙廣播的傳輸限制 .....	45
4.2 編碼參數之模擬流程 .....	47
4.3 選擇最佳化參數 .....	50
4.3.1 模擬參數設定 .....	50
4.3.2 網格搜尋 .....	51
4.3.3 模擬結果與比較 .....	57
4.3.4 結果分析 .....	62
<b>Chapter 5 結論與未來展望.....</b>	<b>64</b>
5.1 結論 .....	64
5.2 未來展望 .....	64
References .....	66

# 圖次



圖 1.1 問題情境示意圖 .....	3
圖 2.1 藍牙 Piconet 與 Scatternet 網路架構示意圖 [5].....	9
圖 2.2 BLE 架構圖 [6].....	11
圖 2.3 藍牙廣播封包重複傳輸機制 [11].....	14
圖 2.4 UTM Architecture [18].....	16
圖 2.5 FAA 公告之標準射頻識別使用情境 [21].....	18
圖 2.6 交錯碼分散錯誤示意圖 [36].....	24
圖 3.1 取得無人機航線行經建築物受阻之數據示意圖 .....	27
圖 3.2 QGIS 系統化航線障礙物分佈數據取得流程圖 .....	29
圖 3.3 無人機飛行路徑的總長度資料格式 ( Tx.csv ) .....	30
圖 3.4 未被建築物遮蔽的路徑長度資料格式 ( Dx.csv ) .....	30
圖 3.5 被建築物遮蔽的路徑長度資料格式 ( Ix.csv ) .....	31
圖 3.6 航線數據生成概念圖 .....	31
圖 3.7 廣播端與接收端流程圖 .....	36

圖 3.8 廣播訊息示意圖 .....	37
圖 3.9 外碼編碼前填補示意圖 .....	37
圖 3.10 加入外碼( Reed-Solomon Code ) 編碼後的廣播訊息示意圖 .....	38
圖 3.11 經過交錯排列後之廣播訊息示意圖 .....	38
圖 3.12 內碼編碼前填補示意圖 .....	39
圖 3.13 加入內碼( Reed-Solomon Code ) 編碼後的廣播訊息示意圖 .....	39
圖 3.14 長訊息廣播分割傳送示意圖 .....	40
圖 3.15 廣播訊息遭受突發錯誤示意圖 .....	41
圖 3.16 訊息重組後示意圖 .....	41
圖 3.17 內碼解碼與抹除標記之示意圖 .....	42
圖 3.18 突發錯誤分散之示意圖 .....	43
圖 4.1 藍牙鏈路層封包和廣播通道協議數據單元 ( PDU ) 之結構 [44].....	46
圖 4.2 計算飛行總時間流程圖 .....	48
圖 4.3 構建路徑上建築物分佈之流程圖 .....	48
圖 4.4 編碼參數模擬示意圖 .....	49
圖 4.5 萬華區 45 公尺飛行高度之訊息接收成功率熱力圖( $M = 1250$ Bytes).....	53

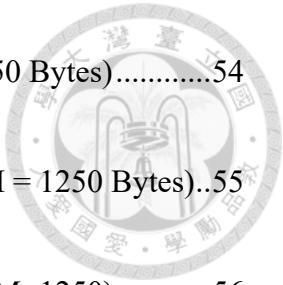


圖 4.6 大安區 20 公尺飛行高度之訊息接收成功率熱力圖( $M = 750$  Bytes).....54

圖 4.7 大安區 45 公尺飛行高度之訊息接收成功率熱力圖對比( $M = 1250$  Bytes)..55

圖 4.8 大安區 45 公尺飛行高度之  $k1$  對訊息接收成功率折線圖( $M=1250$ ).....56

# 表次



表 1.1 使用參數代號與其代表意義之對照表 .....	5
表 3.1 台北市隨機航線生成數據表 .....	32
表 3.2 大安區隨機航線生成數據表 .....	33
表 4.1 常用名詞解釋 .....	44
表 4.2 Advertising channel PDU 類型 [14] .....	46
表 4.3 模擬之控制參數設定對照表 .....	50
表 4.4 模擬之編碼參數設定區間對照表 .....	51
表 4.5 台北市全區與各行政區之建築阻擋率比較表 .....	57
表 4.6 未編碼之訊息接收成功率對照表 .....	58
表 4.7 推薦參數對照表 .....	59
表 4.8 編碼前後之訊息接收成功率對照表 .....	59
表 4.9 萬華區最佳參數於同環境之大安區訊息接收成功率對照表 .....	60
表 4.10 大安區最佳參數於同環境之萬華區訊息接收成功率對照表 .....	61

# Chapter 1 緒論



## 1.1 研究動機

由於無人機的蓬勃發展，各國的監管單位也開始制定相關的規範以確保無人機的飛行安全，目前，一項明確的各國規範共識即為無人機射頻辨識機制 (RID, Remote ID) [1] - [4]。

這項規定的核心是確保無人機在飛行時，能夠透過自主向外界發送廣播訊號的方式被地面裝置識別。然而由於現實環境中存在著許多物理上的接收障礙，例如：在複雜的城市環境中，高樓和其他 2.4GHz 的訊號源會干擾數位通訊協定信號(如：藍牙)，導致在使用數位通訊協定進行廣播訊號接收時，容易會出現短暫的訊號不穩，或是無法順利接收到由無人機所發送出來的廣播訊號的情況，這將使得無人機數位通訊協定之廣播訊號的可靠性 (Reliability) 和可用性 (Availability) 降低。

此外，未來大量無人機的升空將使現有的空域管理面臨安全挑戰。以美國為例，美國國家航空暨太空總署 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 與 FAA 提出了無人機系統交通管理 (Unmanned Aircraft System (UAS) Traffic Management, UTM) 的概念，以管理低空無人機的飛行運營。UTM 是一種協調空域狀態的框架，允許無人機操作者、無人機系統服務運營商( UAS Service Suppliers, USS )和 FAA 合作，確保多架無人機的視距外範圍操作 (BVLOS) 能夠順利進行。

UTM 架構旨在促進監管機構與私人服務提供商的協同合作，並確保未來無人機之間、無人機與 USS 之間的互動更加頻繁和有效。因此，在 UTM 實施的未來，確保無人機在天空飛行時，能夠可靠的傳輸廣播訊息和維持廣播訊息的數據完整

性是亟待解決的問題，特別是在具有許多障礙物且充滿雜訊的都市環境中。

想像一下：在一個未來的城市，天空中有著無數的無人機翱翔著，這些無人機正負責監控城市的交通、載運電商的貨品、收集大氣的數據等繁雜的任務，以維持城市高效的運作。然而，這些無人機卻面臨著巨大的挑戰——密集的高樓大廈如同巨大的屏障般，頻繁地阻擋著它們對彼此與地面接收者所發送的廣播訊號，從而造成廣播數據傳輸的遺失與中斷。

在這個充滿挑戰的都市環境中，無人機就如同進入一座大型的「廣播訊號迷宮」，在這個迷宮中穿行時，每一棟高樓大廈都是潛在的陷阱，隨時準備切斷無人機與地面接收者之間的廣播聯繫，而每一次的訊號中斷，都有可能導致關鍵數據的丟失。

為了解決這個問題，首先，需要先瞭解無人機飛行環境中的「迷宮地圖」——即城市中建築物的分佈情況。然後透過理論推導與模擬等方式，得出最佳的「通關攻略」——意即適合於該飛行區域之最適合的碼率，以解決在充滿障礙物分佈的區域所產生的廣播訊號丟失之問題。

## 1.2 問題表述

近年來，無人機技術的快速發展帶來許多新挑戰，其中空域管理尤為關鍵，受到執法機關的高度關注。為應對這一問題，各國政府已制定了 Remote ID 的相關規範。然而，隨著 Remote ID 技術的普及，隨之而來的資訊安全問題也逐漸受到重視。其中包括無人機在廣播 Remote ID 時的機密性 ( Confidentiality )，可通過加密算法加以保護；完整性 ( Integrity ) 和不可否認性 ( Non-repudiation )，通常透過數位簽章技術解決；以及鑑別性 ( Authentication )，也可由數位簽章進行驗證。

儘管如此，現有文獻對於系統可用性 ( Availability )，特別是在「數位廣播訊號

源於三維空間中快速移動，且通訊環境存在特定物理障礙分佈」時，其穩健性的討論仍顯不足。在無人機空中飛行時，若遇到建築物等物理障礙物的阻擋，可能導致訊息丟失。這與訊息發送方和接收方缺乏相對動態變化的典型遠程通訊系統不同。

因此，現有的增進訊息傳播穩健性之方法，無法有效解決「三維空間中快速移動，且通訊環境存在特定物理障礙分佈」的可用性問題。本研究旨在填補此一空白，特別是探索如何增強數位通訊技術（如：藍牙）在面對此類障礙時的可靠性和持續性。

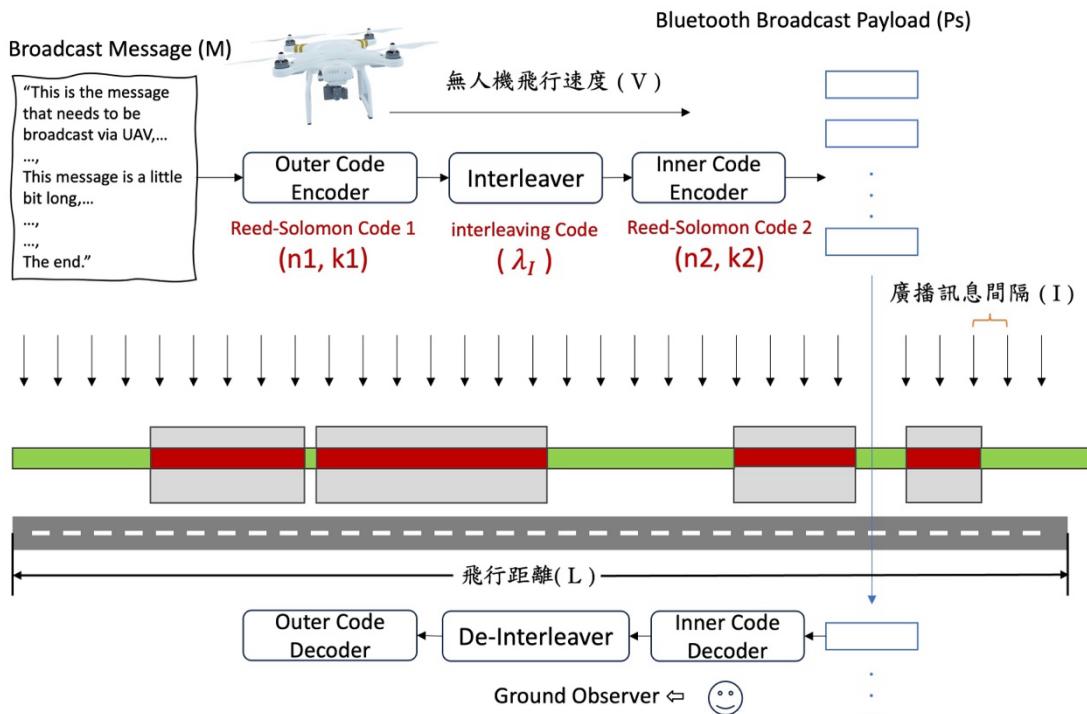


圖 1.1 問題情境示意圖

圖 1.1 為問題情境之示意圖，圖中為表示無人機於高空透過藍牙廣播封包傳遞長訊息時，為了因應可能會遭遇的物理阻隔，所需要進行的編碼流程、廣播訊息傳遞方式、以及接收端在收到廣播封包後，需要執行的解碼步驟流程。

首先，由於藍牙廣播封包之有效訊息量（圖 1.1 中的 Bluetooth Broadcast Payload）

有限，因此長訊息( 圖 1.1 中的 Broadcast Message )需要透過數個封包才能傳遞完成。在這個傳遞的過程當中，可能會遭遇數個物理障礙物的阻隔 ( 如圖 1.1 中的灰色方塊 )，因此本研究提出，在現有的數位通訊廣播機制中，加入一系列的通道編碼機制，以確保即使在訊號源被短暫阻擋的情況下，也能透過冗餘的編碼，在無需重傳廣播訊號的情況下，還原因訊號阻擋而丟失的飛行數據與資料。

長訊息於無人機端需要先進行一次外碼( 圖 1.1 中的 Outer Code Encoder )的編碼，接著通過交錯器( 圖 1.1 中的 Interleaver )進行交錯編碼，接著再進行一次內碼( 圖 1.1 中的 Inner Code Encoder )的編碼。

編碼完成後的訊息會以藍牙廣播封包之有效訊息量進行分批傳送，以給定的傳輸間隔( 圖 1.1 中的廣播訊息間隔 )向地面端進行廣播。

地面接收端( 圖 1.1 中的 Ground Observer )在接收到所有藍牙廣播封包後，需要先將所有封包依序拼接，並標示缺失處。接著依序通過內碼( 圖 1.1 中的 Inner Code Decoder )解碼、解除交錯器 ( 圖 1.1 中的 De-interleaver )、外碼( 圖 1.1 中的 Outer Code Decoder )解碼等步驟，最後即可得出原始長訊息。

具體問題定義如下：給定飛行區域之地圖資料的前提下，在一段固定飛行長度 ( L ) 的無人機航線中，具有多段建築物造成的訊息阻隔。給定無人機的飛行速度 ( V )，固定的訊息傳輸間隔時間 ( I )，選用通訊協議之廣播封包的有效訊息量 ( Ps )，該如何針對不同長度的廣播訊息 ( m )，透過模擬來選擇最適當的外碼 ( Reed-Solomon Code ) 參數 (  $n_1, k_1$  ) 交錯碼的參數 (  $\lambda$  ) 與內碼 ( Reed-Solomon Code ) 參數 (  $n_2, k_2$  )，以確保訊息在被阻隔的情況下，依舊能夠最大化的被還原回來呢？

為了解決此問題，本研究針對不同建築物分佈的飛行環境，透過真實世界的地圖資料進行建模與自動化選取隨機航線的分析，得出不同環境下之航線的建築物

分佈。並且透過數值模擬的方式，得出在不同飛行環境下，訊息接收成功率最高的編碼參數組，使得未來實際應用上，能夠透過給定特定的飛行區域與飛行高度而得出所需的最適當之編碼參數。

下表 1.1 為本研究所使用之參數代號與其代表意義之對照表。

表 1.1 使用參數代號與其代表意義之對照表

參數代號	代表意義
L	飛行航線總距離 ( m )
V	無人機飛行速度 ( m/s )
R	訊息遮蔽率 ( 錯誤率 )
M	訊息總長度 ( Bytes )
$n_1$	外碼之 RS Code 參數 ( 加入冗餘後之總長度 )
$k_1$	外碼之 RS Code 參數 ( 原始訊息之總長度 )
$\lambda_I$	交錯碼之深度 ( Interleaving Degree )
$n_2$	外碼之 RS Code 參數 ( 加入冗餘後之總長度 )
$k_2$	外碼之 RS Code 參數 ( 原始訊息之總長度 )
$P_s$	通訊協議之廣播封包有效負載上限 ( Byte )
I	廣播封包之傳輸間隔時間 ( s )

### 1.3 主要貢獻

1. 提出透過雙層里德 · 所羅門碼結合交錯編碼之串聯編碼的方式，用以解決無人



- 機於城市環境中遇到廣播訊號阻擋的問題。
2. 提出在無人機於城市環境中遇到的訊號阻擋情形之精確建模的方法論。並提出一套適用於開源 GIS 的自動化分析流程，能夠有效的批次產生適合用來模擬於都會區飛行時遭遇障礙物的真實世界資料。透過此模型將能夠根據實際地區的圖資，精確描述該地區之建築物阻擋分佈情況。此方法同樣適用於其他具有相同訊號阻擋環境之非城市環境。
3. 提出基於真實世界圖資建模後，獲取針對該地區之無人機廣播訊號編碼參數的模擬方法，透過該方法能夠清楚分析特定於特定地區與飛行高度所需之最適當的編碼參數。透過上述建模與模擬方法，得出於台北市大安區、萬華區，飛行高度在 20 公尺以上，分別所需的推薦編碼參數組( $n_1, k_1, n_2, k_2, \lambda$ )。

## 1.4 章節內容概述

本論文共分為五個章節，第一章為緒論，敘述本篇論文之研究動機、問題論述、主要貢獻及章節概述。

第二章為文獻探討，首先針對藍牙的起源、版本更新、工作原理、錯誤更正機制、穩健性分析等面向介紹，然後對於無人機的管理背景與架構進行描述，以及本論文所使用的通道編碼與其技術原理。

第三章為研究方法，主要講述本研究為了分析所使用的方法論，包含提出一套基於開源 GIS 的自動化分析流程以及本研究所提出的串聯編碼之詳細流程設計。

第四章為編碼應用與模擬，主要提出一套模擬方法，用以在不同地區與高度的真實地圖資料中，模擬並選擇最適當的編碼參數。

第五章為結論與未來展望，總結全篇論文所使用的方法與結果，最後也提出本研究可繼續延伸的未來展望。



## Chapter 2 文獻探討



本章將介紹本論文會使用到的相關背景知識與其文獻探討，主要以藍牙、無人機、通道編碼等三個面向分別展開討論。

### 2.1 藍牙 (Bluetooth)

藍牙 (Bluetooth) 是一種無線通訊技術，專為短距離通訊設計（通常是 10 公尺，使用功率較大的設備可達 100 公尺），能夠在不同裝置之間傳輸數據。它最初是為了替代有線連接而開發的，現在已經廣泛應用於各種設備之間的資料傳輸和共享，包括手機、筆記型電腦、耳機、汽車音響系統和智慧家庭設備等。

藍牙技術由愛立信 (Ericsson) 於 1994 年創建，目的是替代 RS-232 數據線。藍牙不僅提供了一種低功耗、低成本的無線通訊方法，還具有跨平台的特性，使得各種不同的裝置都可以互通訊。它使用 2.4 GHz ISM (Industrial Scientific Medical) 頻段，這個頻段在全球都是免費且不需要執照的，但也因此面臨許多其他裝置的干擾，如 Wi-Fi 和家用電器。因此，藍牙採用了頻率跳躍技術，每秒跳躍 1600 次，以減少干擾和增強信號的穩定性。

藍牙裝置通過建立一個稱為 piconet 的小型網路來通訊。在一個 piconet 中，有一個主裝置和最多七個從裝置。主裝置控制所有的通訊，而從裝置只能與主裝置通訊。這種結構確保了網路的同步和組織。當兩個 piconet 接近時，若其中一個裝置同時作為兩個 piconet 的成員，則它們可以形成一個稱為 scatternet 的更大網路，如圖 2.1。

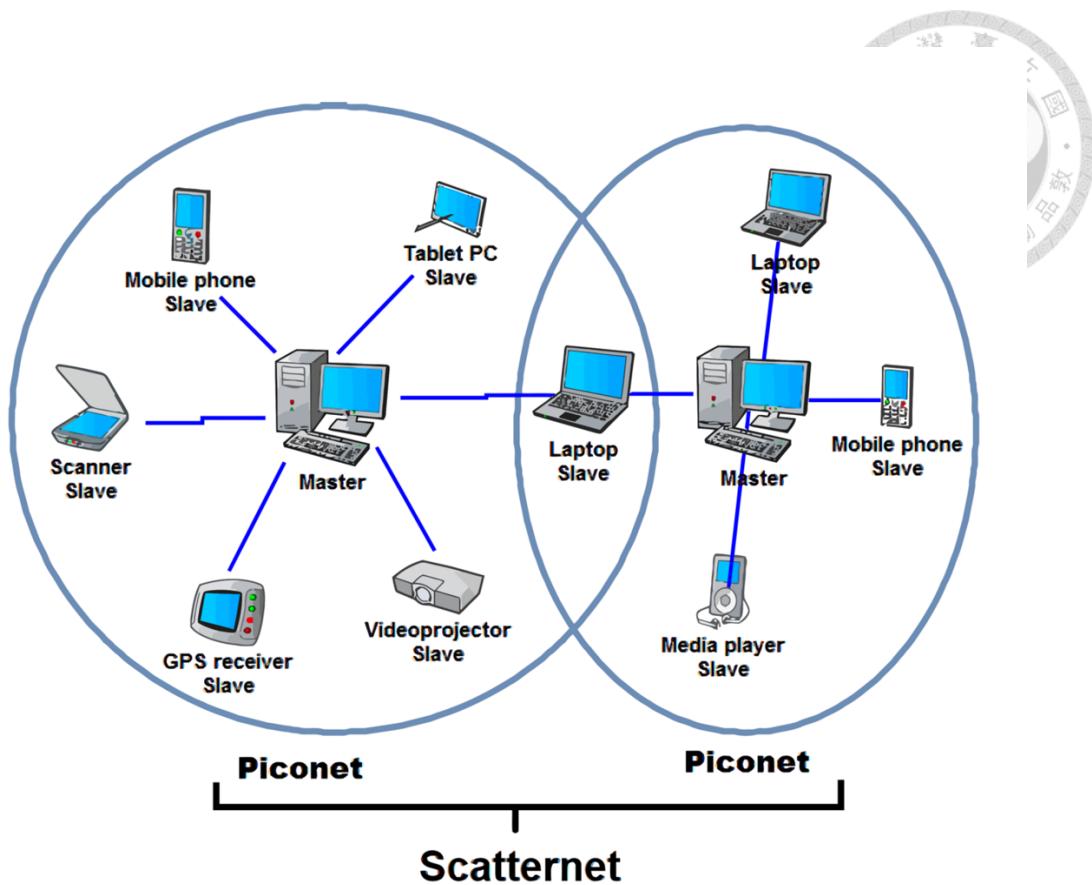


圖 2.1 藍牙 Piconet 與 Scatternet 網路架構示意圖 [5]

藍牙使用一種稱為 SSFH ( Spread Spectrum Frequency Hopping ) 的技術來減少干擾和增強信號的穩定性。SSFH 是一種無線通訊技術，它通過在一系列的頻率中快速跳躍來傳輸數據，從而使得單一的干擾源難以影響整體通訊。此外，藍牙還採用了多種安全措施，如加密和驗證，以確保數據的安全性。

隨著技術的發展，藍牙標準也在不斷進化，目前已經發展到了 5.4 版本。相比於早期版本，藍牙 5.0 提供了更快的傳輸速度（在短距離傳輸中，藍牙 5.0 的速度可以達到 2Mbps，這是藍牙 4.2 最大速度的兩倍）、更大的傳輸距離（相較於藍牙 4.2，其涵蓋範圍提升高達 4 倍，在理想環境下可能達到 400 公尺）、更高的廣播訊息容量（廣播訊息的容量，使其為藍牙 4.2 的 8 倍）以及更低的能耗 [6]。

而在藍牙 5.1 中則引入了方向尋找功能，這項新功能使藍牙裝置能夠確定訊號



的方向。透過測量訊號到達接收器的相對角度，藍牙 5.1 的裝置能夠準確地定位其他藍牙裝置的位置。這對於物品追蹤與定位系統特別有用，能將位置的準確範圍從公尺縮小到公分等級 [7]。

藍牙 5.2 則引入了 LE Audio 來改善音訊傳輸的品質，LE Audio 允許多個音訊串流同時使用一個藍牙連接。這意味著一個裝置可以同時將音訊傳送到多個裝置，或者多個來源裝置可以將音訊傳送到同一個接收裝置。而 LE Audio 使用了新的 LC3 ( Low Complexity Communications Codec ) 編碼，可以提供更高的音訊品質，並在低功耗情況下運作 [8]。

藍牙 5.3 進一步的提升了其抗干擾的能力與安全性，並且有著更低的延遲以及功耗 [9]。而在最新版的藍牙 5.4 當中，則是針對藍牙的廣播功能提供更多的新功能，包括新增了響應式的週期性廣告 ( Periodic Advertising with Responses, PAwR ) 以及加密的廣告數據 ( Encrypted Advertising Data, EAD ) [10]。

這些演進確保了藍牙技術能夠滿足不斷增長的市場需求，並在未來的數位生態系統中發揮關鍵作用。

### 2.1.1 低功耗藍牙 (Bluetooth Low Energy)

Bluetooth Low Energy (BLE)，是一種針對低功耗設備所設計的無線通訊技術，首次在 2010 年被引入到藍牙核心規範中。

BLE 的起源可以追溯到 Nokia 的一個項目，最初被稱為 Wibree，該項目於 2006 年公開。Wibree 旨在開發一種比當時的藍牙技術更省電的無線通訊方式。2007 年，Wibree 與藍牙特別利益小組 ( SIG ) 合併，這一合併最終導致了 BLE 技術的誕生，並作為藍牙 4.0 規範的一部分被正式發布。

BLE 的核心優勢在於其低能耗設計，它通過簡化通訊協議和減少傳輸功率來實現這一點。此外，BLE 設備在非連接狀態下可以處於睡眠模式，只有在需要通訊時才會被喚醒，這也進一步降低了能耗。

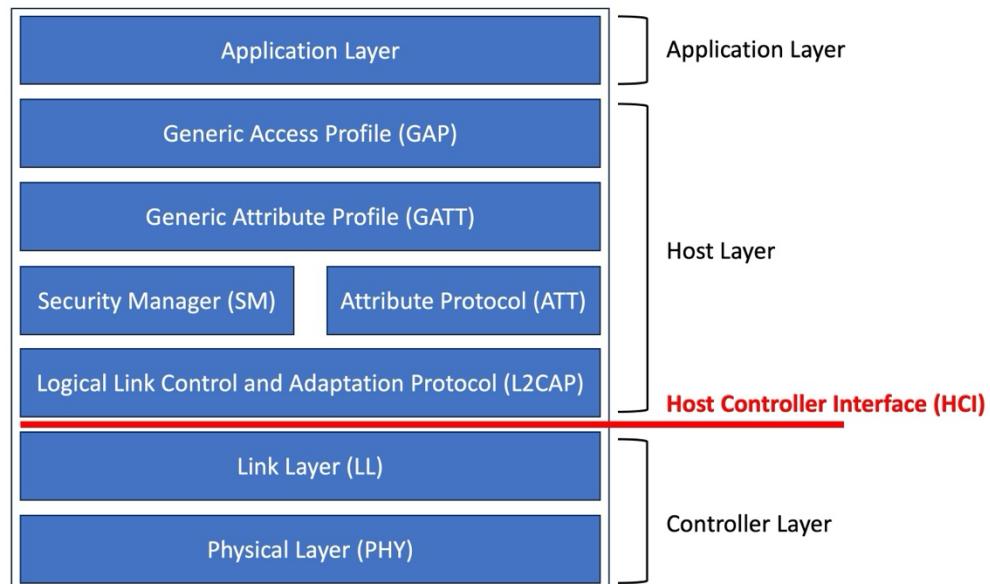


圖 2.2 BLE 架構圖 [6]

圖 2.2 為 BLE 的架構圖。從圖 2.2 可以看出 BLE 主要由三個部分組成，分別為控制器層( Controller Layer )、主機層( Host Layer )與應用層( Application Layer )。位於最下方的控制層由物理層 ( Physical Layer ) 與連結層 ( Link Layer ) 組成。Physical Layer 負責無線訊號傳輸。BLE 分為 40 個頻道，第 37 到 39 個稱為廣告頻道 ( Advertising Channel )，主要負責收發 Advertising PDU，其餘的 37 個稱為資料頻道 ( Data Channel )，主要用來傳輸資料。

Link Layer 負責 Scanning 與 Advertising、建立連線並確保資料傳輸，此層也定義了協議數據單元 ( Protocol Data Unit, PDU ) 的類型。

主機層位於控制層上方，其內部包含邏輯連接控制與匹配協定 ( Logical Link Control and Adaptation Protocol, L2CAP )、安全管理器 ( Security Manager, SM )、屬性協定( Attribute Protocol, ATT )、通用屬性設定檔( Generic Attribute Profile, GATT )、通用訪問設定檔 ( Generic Access Profile, GAP )。而最上方則為使用藍牙功能的應用層。

BLE 的工作原理主要基於兩種模式：廣播模式和連接模式。在廣播模式下，BLE 裝置定期發送包含少量數據的廣播包，如裝置名稱或服務資訊。這使得其他裝置能夠掃描到並識別出廣播裝置的存在和其提供的服務，而無需建立持久的連接。廣播模式是能耗非常低的一種通訊方式。而當兩個 BLE 裝置需要進行更頻繁的數據交換時，它們可以從廣播模式切換到連接模式。在連接模式下，兩個裝置會建立一個持久的連接並進行雙向通訊。這種模式下的能耗相對較高，但仍然遠低於傳統藍牙。

BLE 通訊的資料結構是基於「服務 ( Service )」和「特性 ( Characteristic )」這兩個概念。一個服務是一組功能相關的特性的集合。例如，一個心率監測服務可能包括心率測量特性、傳感器位置特性等。特性是服務中的一個數據點，代表了一個特定的數據值或一組相關的數據。每個特性都有一個唯一的 UUID ( 通用唯一識別碼 )，以及與之相關的「屬性 ( Attribute )」( 如讀取、寫入、通知等 )。

另外，BLE 裝置有不同類型的連線可用。BLE 連線項目最多可以有 4 個不同的功能：「廣播者 ( Broadcaster )」、「觀察者 ( Observer )」、「中央 ( Central )」和「周邊 ( Peripheral )」。廣播者模式會定期向周圍發送廣告數據封包的設備，但不允許任何連接。觀察者模式下的 BLE 裝置可以掃描周圍的廣播設備，但不能要求與廣播設備連接。在中央模式下，BLE 裝置能夠發現 BLE 周邊設備和廣播設備的設備，

並具有與周邊設備建立連接的能力。周邊設備是會宣告其存在的設備，具有接受來自中央設備連接的能力，被允許定期與中央設備進行連接和資料傳輸。

與傳統藍牙技術相比，BLE 在保持通訊能力的同時，大幅降低了能耗，使其成為適用於長期運行在電池供電的小型設備上的理想選擇。這一技術的引入，開啟了藍牙技術在智慧醫療、智慧穿戴、智慧家庭和工業控制等領域的全新應用。

### 2.1.2 藍牙錯誤更正機制

在藍牙 4.0 協議中的錯誤更正機制主要有以下三種 [11]：

1. 1/3 rate Forward Error Correction：每個位元被重複三次。例如，如果原始位元是 1，則編碼後的位元串將是 111；如果原始位元是 0，則編碼後的位元串將是 000。
2. 2/3 rate Forward Error Correction：使用 ( 15, 10 ) 漢明碼 ( Hamming Code )，編碼後，原來資料只佔 2/3。假設資料長度為 10 個位元，則編碼後成為 15 個位元。
3. Automatic Repeat request (ARQ)：當接收方接收到封包並檢測到錯誤時（例如透過 CRC 檢查和不匹配），它會要求發送方重傳該封包。

而在藍牙廣播封包的錯誤更正機制則是採用重複傳送的方式，由於廣播封包是由主設備（Master）同時向所有從設備（Slave）所發送的封包，在使用多個跳頻序列的情況下，每次傳輸可能僅被部分從設備接收。在這種情況下，主設備可以在每個跳頻序列上重複傳輸。

因為廣播消息不會被確認接收，且每個廣播封包至少需要固定次數的傳輸，每個廣播封包應在下一個相同廣播消息的廣播封包傳輸之前傳送 NBC 次，如圖 2.3

所示。

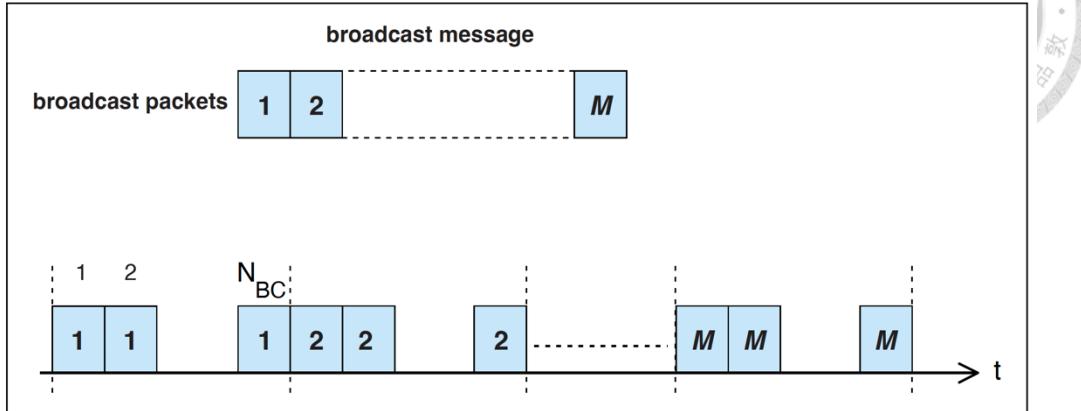


圖 2.3 藍牙廣播封包重複傳輸機制 [11]

### 2.1.3 藍牙穩健性

在分析一個由控制器、目標裝置和之間的通訊管道所組成的遠程通訊系統的可靠性時，可以將通訊連結成功的機率  $p_{rel}$  表示成 [12]：

$$p_{rel} = p_{QoS} \times p_{operational} \quad (2.1)$$

其中， $p_{QoS}$  是必要服務品質 ( Quality of Service ) 達成的機率， $p_{operational}$  則是通訊管道可用的機率。而  $p_{QoS}$  又可以表示成：

$$p_{QoS} = p_{correct} \times p_{response} \times p_{rate} \quad (2.2)$$

其中， $p_{correct}$  是指接收到的數據是正確的機率， $p_{response}$  是反應時間足夠短的機率， $p_{rate}$  是資料有透過足夠高的碼率進行傳輸的機率。因此  $p_{rel}$  為：

$$p_{rel} = p_{correct} \times p_{response} \times p_{rate} \times p_{operational} \quad (2.3)$$

在典型的通訊傳輸期間，考慮每個傳輸位元的相對可靠性，硬體故障可能只發生一次，而長反應時間和低傳輸碼率的事件可能僅對整個傳輸封包產生影響，但位元損壞可能會在封包內的每個位元中出現，因此可以假設位元損壞的事件比其他事件更常發生。所以，在分析遠程通訊系統的可靠性時， $p_{correct}$  是最重要的 [12]。

為了增加 $p_{response}$ ，有研究引入了一種新的廣播自動重複請求機制 ( Extended-ARQ )，根據訊號強度指標 ( RSSI ) 動態調整廣播數據包的重傳次數，以最大化廣播通訊的可靠性和流通量 ( Throughput ) [13]。

在 $p_{correct}$ 的部分，也有研究提出使用 BCH ( 15, 7 ) 碼、Hamming ( 7, 4 ) 碼和 Cyclic( 15, 11 ) 碼進行替代 Hamming( 15, 10 ) 碼的性能改善。結果顯示：使用 BCH ( 15, 7 ) 碼可以在錯誤控制方面提供更高的性能，即便冗餘度增加。Hamming ( 7, 4 ) 碼在保持較低冗餘度的情況下仍能提供一定的錯誤控制能力。Cyclic ( 15, 11 ) 碼則可以在保持數據長度的同時提供較低的冗餘 [14]。

為了改善低功耗藍牙 ( BLE ) 連接的可靠性，有研究提出了基於實時監控個別頻道的數據封包傳輸率 ( PDR ) 來進行連接品質評估的頻道黑名單 ( Channel Blacklist )，以及基於最近的訊噪比 ( SNR ) 測量來動態改變所用的 PHY 模式的自適應調整機制 ( Adaptive Frequency Hopping ) [15]。

而為了分析與優化 BLE 廣播網路在大規模物聯網實際應用上的網路性能 [16] 提出了 ReliaBLE 的架構，允許廣播設備根據環境中的干擾動態調整其廣告頻率和重複傳輸的數量，以最大化數據接收率。

## 2.2 無人機交通管理 ( UAS Traffic Management )

隨著無人機技術的進步，它已不再僅僅是娛樂用途，而是漸漸在各種商業和研究領域中取得其地位。然而，這快速的成長帶來了一系列的挑戰，其中最大的挑戰是如何確保天空中的飛行安全。各國的航空管理部門也正努力為此尋找解決方案。

## 2.2.1 無人機系統交通管理



為應對無人機的空域管理問題，NASA 於 2013 年提出無人機系統交通管理 (Unmanned Aircraft System (UAS) Traffic Management, UTM) 概念性框架 [17]，旨在確保多個無人機的飛行活動能夠協同運行。該框架於 2015 年被 FAA 確認，並由第三方支援無人機運營商進行空域管理。也就是在 FAA 負責空域管理架構下，無人機交通管理的空域管理運作，是由 FAA、無人機營運商與第三方支援服務商共同協作達成 [17]。

FAA 與 NASA 即共同組成 UTM Research Transition Team ( UTT )，擬定 UTM 運作概念與使用案例發展、資料交換與資訊系統架構、偵測與避讓，以及通訊與導航等主題研究與發展計畫。並於 2018 與 2020 年發表 UTM 運作概念報告 ( UTM Concept of Operations ) v1.0 與 v2.0，匯總說明 UTM 相關研究與發展主題實施與精進成果。

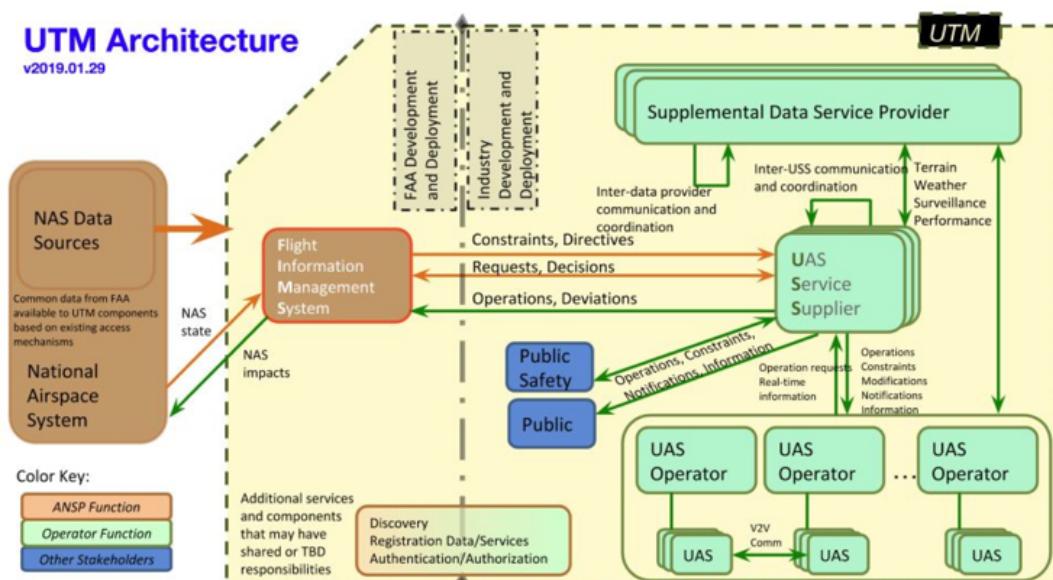


圖 2.4 UTM Architecture [18]

圖 2.4 為 NASA 所提出的 UTM 框架 [18]，說明了在一個 UTM 系統中，監管單位與民營的無人機系統服務運營商(UAS Service Suppliers, USS)之間的互動方式，以及未來 USS 預計會向無人機系統(Unmanned Aircraft Systems, UAS)提供的服務類型與資料取用流程框架。通過 UTM，無人機操作者、USS 和 FAA 之間將進行合作互動，以確定和實時同步空域狀態 [19]。其中，於 2020 年公佈之 UTM Concept of Operations v2.0，於 2.6 Remote Identification 章節定調運用無人機系統射頻識別 ( Remote Identification, RID ) 機制於低高度空域之無人機飛航營運，來回應社會大眾對於隱私保護與公共安全威脅的考量。

### 2.2.2 無人機射頻辨識機制 ( Remote Identification )

FAA 依其 UTM 示範計劃 ( UTM Pilot Project, UPP )，於 2021 年 4 月 21 日正式公告生效遙控無人機射頻識別的最終規定 [20]。此規定要求無人機製造商於 2022 年 9 月 16 日出廠之無人機必須具備射頻識別的功能 ( 展延至 2022 年 9 月 16 日起正式施行 )；且所有遙控無人機飛航活動運作，於 2023 年 9 月 16 日都必須符合美國聯邦法規第 14 篇第 89 編 ( 14 CFR Part 89 ) 的操作要求。

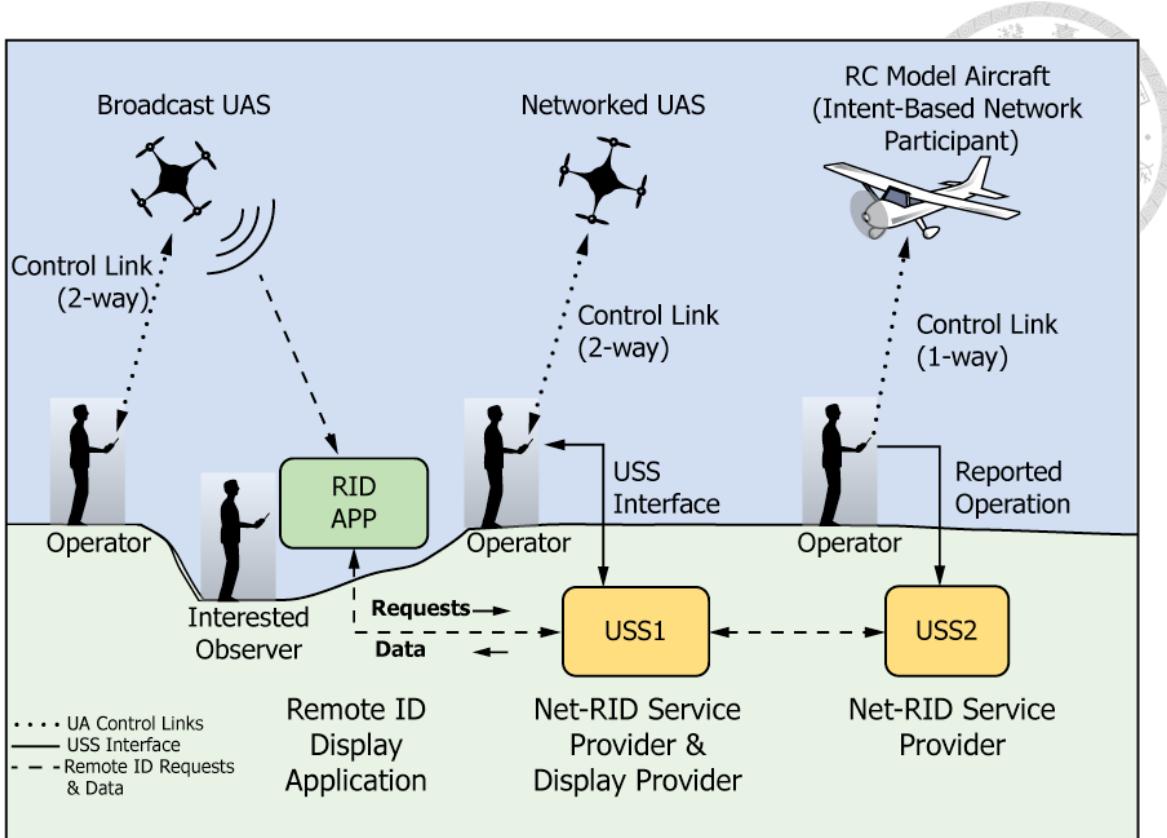


圖 2.5 FAA 公告之標準射頻識別使用情境 [21]

目前我國民航局也已完成「遙控無人機管理規則部分條文修正草案」，其中規定民國 115 年起在市面銷售的無人機都要具射頻識別功能，透過手機 APP 就可查無人機是否違規飛行。

這些規定的核心是確保無人機在飛行時能夠被周邊裝置識別與追蹤。因此，無人機在空中飛行時，需要透過 RID 這套機制持續地對外廣播其身份資料與飛行資訊，並且要能夠被周遭範圍內的複數裝置接收到，以便地面觀察者及執法單位能夠追蹤無人機飛行的座標及速度等資訊。

為了確保 RID 能夠有效地被接收，FAA 規定無人機可以使用藍牙或 Wi-Fi 技術進行廣播。雖然 Wi-Fi 具有高速的數據傳輸能力，但考慮到 RID 僅需要傳送小量資料，以及藍牙的低能耗和泛用性，因此大多數無人機製造商選擇使用藍牙技術。



### 2.2.3 無人機近期資安研究

隨著近年無人機的快速發展，不少與無人機有關的學術研究也刊登在國際期刊中。這其中一部份是在探討有關 Remote ID 的資訊安全與隱私保護。由於在 Remote ID 的廣播訊息中存在著兩種不同類型的資料，分別為可以被所有人接收並讀取的公開資料（Public Data），以及需要避免被未經認證之實體取的的私人訊息（Payload Data）。為了避免 Payload Data 被有心人士盜取，進而導致身份冒用或個人資料外洩等資安疑慮，因此許多研究深入探討了關於無人機的資訊安全，包含防止個人資料外洩、飛行資訊竄改等。

如[22]中，透過使用暫時的假名（Ephemeral Pseudonyms）進行廣播，並且將與假名對應的真實個人資訊保存在飛航主管單位中，確保只有該主管單位才能夠得知無人機的真實身份。[23] 透過分別實踐 Camenisch-Lysyanskaya Signatures [24] 以及 Derler-Slamanig Signatures [25]，使 Remote ID 能夠無需透過權力第三方（Trusted Third-Party, TTP）機構進行訊息驗證，而是能夠在不洩漏個人資訊的前提下，由一般觀察者進行訊息的簽章驗證。

[26], [27] 則是試圖透過將 UTM 結合 Blockchain 架構，來防止飛行資料被惡意竄改。[26] 利用以太坊（Ethereum）結合群眾感知（Crowd-Sensing）的方式來管理 UTM 的架構；[27] 則透過 Hyperledger Iroha 來儲存無人機的飛行資料，並且讓觀察者直接透過觀察無人機的 Remote ID 與區塊鏈上的資料做比對，來進行此架無人機飛行是否合法的確認。

其他的研究則是著重在無人機傳送 Remote ID 的硬體模組上，包含能耗、效能、訊號覆蓋範圍、訊息傳輸位元率等。如 [28] 透過 MATLAB 來模擬在不同場

景下，透過 LoRa 來傳輸 Remote ID 訊號的可靠性與其覆蓋範圍。



## 2.3 通道編碼 ( Channel Coding )

通道編碼是數位通訊中，用於保護數據免於受到傳輸過程中錯誤影響的技術。其基本理念是在傳送數據之前添加冗餘訊息，從而使接收端能夠透過額外的冗餘資訊進行檢測，甚至在無需重傳的情況下糾正錯誤。[29][30]

### 2.3.1 抹除碼 ( Erasure Code )

抹除碼 ( Erasure Code ) 是一種通道編碼技術，主要用於在數據傳輸的過程中，糾正由於資料封包遺失所導致的錯誤[31]。抹除碼透過在數據傳輸之前添加冗餘資料，使得接收端能夠在不要求原始數據發送端重新傳輸的情況下，重建在傳輸過程中所遺失的數據。

抹除碼的工作原理包括將原始資料分割成多個資料塊，並產生一定數量的冗餘資料塊。這些冗餘的資料塊使得即使一部份的原始或冗餘資料塊在傳輸過程中丟失，接收端依然能夠重建整個原始資料。

這種編碼技術的典型例子包括里德-所羅門碼 ( Reed-Solomon Code )、低密度奇偶校驗碼 ( Low-Density Parity-Check Code ) 和渦輪碼 ( Turbo Code )，這些碼類因其高冗餘效率和強錯誤更正能力而在多個應用領域中得到廣泛使用。

### 2.3.2 里德-所羅門碼 ( Reed-Solomon Code )

里德-所羅門碼是一種在 1960 年被 Irving S. Reed 和 Gustave Solomon 提出的

錯誤更正演算編碼機制 [32]，它是基於有限體 ( Galois Field, GF ) 算術的非二進位編碼方法。有限體指的是一個包含固定數量元素的集合，其中定義了加法和乘法兩種運算，並且在這兩種運算下滿足封閉性、交換律、結合律、分配律，同時存在單位元素和反元素。

其核心思想是：首先，將欲傳送的原始訊息分割成一組長度為  $k$  的資訊符號，例如  $(m_0, m_1, \dots, m_{k-1})$  接著將這  $k$  個資訊符號，視為一個在有限體  $GF(q)$  上定義的訊息多項式  $P(x)$  的係數，形式如下：

$$P(x) = m_0x^{k-1} + m_1x^{k-2} + \dots + m_{k-2}x^1 + m_{k-1}x^0 \quad (2.1)$$

此處的有限體  $GF(q)$  是一個包含  $q$  個元素的有限數學集合 ( 例如  $q = 2^r$  )， $q$  代表的是該有限體的大小，也就是該有限體總共包含多少個元素。而  $x$  為多項式的變數，範圍是整個有限體  $GF(q)$ 。

$P(x)$  是一個由原始訊息所決定的多項式，值域是整個有限體  $GF(q)$ 。其意義為將一串離散的字串或訊息 ( 數據 ) 轉變成一個具有多項數學性質的多項式，透過最高項為  $k-1$  的多項式的形式，只要擁有擁有  $k$  個點的值即可確定該多項式，而多餘的點即為冗餘的錯誤更正能力來源。

編碼過程則是選取在  $GF(q)$  上的  $n$  個不同求值點，並計算  $P(x)$  在這些點上的值。最終產生的這  $n$  個計算結果，即構成一個長度為  $n$  的碼字 ( Codeword )。由於  $n$  大於  $k$ ，多出來的  $(n - k)$  個符號即為冗餘資訊。

此碼主要用於對資訊具有高度可靠要求的傳輸應用中，能夠有效糾正傳輸過程中所發生的錯誤，其關鍵優勢在於其對突發錯誤 ( Burst Error ) 和隨機錯誤 ( Random Error ) 的高容錯率。

在技術實現上，里德-所羅門碼使用多項式來表示數據，並通過增加符號的方

式來進行冗餘編碼。這種編碼方式允許使用者在接收端，即使缺少一部分接收符號 ( symbols ) 的情況下，也能完全回復原始數據。

若原始數據為  $k$  個符號，則在編碼過程中會增加  $n - k$  個符號來形成長度為  $n$  的編碼數據。編碼後，可使得此系統能糾正  $(n - k)/2$  個任意符號錯誤或  $(n - k)$  符號抹除錯誤。

本研究於模擬與驗證階段，採用 Python 的 reedsolo 開源函式庫實作里德-所羅門碼之編碼與解碼流程。該函式庫以 Cython 優化有限體運算，並支援不同大小的有限體  $GF(q)$  參數[33]。

### 2.3.3 交錯碼 ( Interleaving Code )

交錯碼是一種錯誤更正技術，需要搭配其他的錯誤更正碼一起使用，專門用於解決在傳輸過程中發生連續錯誤的情況，進而增加數據傳輸的抗干擾能力。其核心思想是將連續的數據分散，使得原本連續的數據在時間或空間上被「交錯」放置。這種策略通過將編碼後的訊息「平均」分布於更大範圍的序列中，使得局部的大範圍數據損壞不會影響到單一碼字 ( codeword )。這樣，即便是在不良的通訊環境下，與之搭配的錯誤更正碼也能更有效的糾正這些分散的錯誤，從而增強整體通訊過程的錯誤更正能力[34]。

交錯碼有一個主要的參數  $\lambda$ ，也被稱作 Interleaving Degree，是用來量化交錯編碼效果的參數，越大的  $\lambda$  能夠使得原始碼字中的資料單位，被均勻分散至更廣的範圍，通常代表著能應付更多的連續突發錯誤，但時也會帶來更高的處理延遲。

從理論的角度， $\lambda$  的大小必須要大於連續突發錯誤的位元長度，才能有效將該錯誤均勻打散到不同的碼字當中。而在關於編碼與調製的研究當中，有研究指出

$\lambda$  僅需等於數倍的符號位元長度，即可達到最佳的交錯效果 [35]。因此，並不是一昧的加大  $\lambda$  就能達到更好的效果，正確地依據使用情境選擇適合的  $\lambda$  是非常重要的。



在技術層面上，交錯是通過重新排列數個資料塊中的符號來實現的。如圖 2.6，有一組由 16 個符號所組成的訊息，其中每四個符號為一組碼字，意即符號 1 到 4 為一組碼字，符號 5 到 8 為一組碼字，以此類推，如圖 2.6(a)。

將這由 16 個符號組成的訊息以碼字的組合排列成二維的陣列，如圖 2.6(b)。接著，將每一組碼字的首個符號依序按照 Interleaving Degree 取出（此圖例之 Interleaving Degree 為 4，即等同於碼字長度），成為新的序列順序，再將每一組碼字的第二個符號依序加入至此新序列，以此類推，如圖 2.6(c)。

假設在此訊息傳遞的過程中，發生了連續的突發錯誤，使得符號 13, 2, 6, 10 出現錯誤，在圖中以紫色表示之，如圖 2.6(c)。由於經過交錯器的處理，因此這段連續的突發錯誤，實際上被分散到了不同的碼字中，使得每組碼字都恰好分得一個符號的錯誤，如圖 2.6(d)。

若每組碼字的訊息還原容忍度為 1 個符號，則此訊息在遭遇到上述連續錯誤後，依然能夠還原回原始訊息。

(a) 

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----



(b) 

1	5	9	13
2	6	10	14
3	7	11	15
4	8	12	16

(c) 

1	5	9	13	2	6	10	14	3	7	11	15	4	8	12	16
---	---	---	----	---	---	----	----	---	---	----	----	---	---	----	----

(d) 

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----

圖 2.6 交錯碼分散錯誤示意圖 [36]

交錯技術與其他錯誤更正碼如里德-所羅門碼結合使用時，可以提供極強的錯誤糾正能力，尤其是在衛星通信和數字電視廣播中表現出色，能夠在極端的傳輸條件下保證資料的完整性。透過這種複合編碼策略，即使在極端的干擾或損壞情況下，也可以恢復原始數據，顯著提高了通訊系統的穩定性和可靠性。

#### 2.3.4 串聯碼 ( Concatenated Code )

串聯碼是由多組編碼組合而成的複合式編碼方案，由 Forney 於 1966 年提出其理論框架[37]。其基本思想是將一種編碼的輸出作為另一種編碼的輸入，結合兩種編碼在錯誤更正能力和解碼複雜度之間取得平衡。典型結構為「外碼」加上「內碼」：外碼使用強健但解碼複雜度較高編碼機制，內碼則使用能夠有效解碼隨機錯誤的編碼機制。編碼時，先將原始資料經外碼編碼成較長的符號序列，再將該序列送入內碼再進行一次編碼。

而接收端在接受到訊息後，則需先用內碼解碼，將大部分的隨機位元錯誤進行修正，接著再以外碼解碼，還原殘餘的符號錯誤。

串聯碼的特點在於：透過將所需的計算分解為可管理的片段，來解決編碼複雜性的問題。傳統長碼在總編碼區塊長度增加時，雖然錯誤率可以呈指數級下降，然而其計算複雜度亦會隨著區塊長度呈指數增加；而串聯碼可以在總編碼區塊長度增加時，使得錯誤率呈指數級下降，同時維持計算複雜度僅以總長度的多項式時間級增長。

儘管相較於單一長碼，串聯碼可能在性能上稍遜於單一長碼，但串聯碼能在實現超長碼的同時，顯著降低解碼複雜度[37]。

得益於兼具錯誤修正能力與可接受之解碼複雜度，串聯碼已成為多媒體光碟與深空通訊之標準編碼機制。在商用儲存領域，CD 與 DVD 由於其光碟的性質，容易受到刮痕和髒污的影響，產生連續的叢發式錯誤，因此 CD 的編碼機制採用 Cross-Interleaved Reed-Solomon Code (CIRC)，透過將 RS(32, 28)作為內碼，與作為外碼的 RS(28, 24)串聯，結合雙層的里德-所羅門碼以應對叢發錯誤[38]。

DVD 則是採用 Reed-Solomon Product Code (RSPC)，將雙層的里德-所羅門碼結合乘積碼，於列方向使用 RS(182, 172)、行方向使用 RS(208, 192)，以因應更高資料密度與更嚴苛的叢發錯誤環境[38][39]。

在航太領域，串聯碼也被應用在 NASA 的深空探索計劃，如：航海家 1 號 (Voyager 1)、航海家 2 號 (Voyager 2) 等太空探測器，對地球控制中心的通訊傳輸即採用卷積碼 (Convolutional Code) 作為內碼，並結合里德-所羅門碼作為外碼使用 [40][41]。



## Chapter 3 研究方法

本研究透過交錯碼結合里德-所羅門碼的方式應用在數位通訊（如：藍牙）廣播，以解決無人機在空中飛行遇到障礙物阻擋廣播訊號。目前對無人機的廣播訊號造成阻擋的障礙物，主要是林立於都會區中的高樓大廈，隨著建築群的密集程度提高，對無人機廣播訊號的阻擋程度也會隨之提高。

為了針對具有不同建築物密度的飛行環境選定適當的編碼參數，因此了解無人機飛行環境的建築物分佈是必要的。為了將航線上的建築物分佈建置成可供進一步分析的模型，本研究將透過排隊理論來描述無人機航線上遭遇障礙物的分佈情況。

為了進行接下來的研究分析，需要先針對本研究情境之問題作出以下假設：

1. 假設無人機於航線上皆以等速飛行，且由於飛行距離足夠長，因此可以將起降過程中的加減速過程忽略不計。
2. 假設無人機向外界廣播之訊號皆是以某種數位通訊協定（如：藍牙）進行廣播傳送，因此其訊號為離散形式之數位訊號。
3. 假設無人機之廣播訊號在與地面接收者的連線之間，遭遇到建築物或其餘遮蔽物時，該時間段之訊號將會遺失；而若無人機與地面接收者之連線間，並無建築物或其他的障礙物阻隔，則該時間段的訊號將能夠完整的被地面接收者接收。
4. 假設有一觀察者位於足夠遠處且垂直於航線，無人機沿著平行於航線且不會遭遇障礙物的航線飛行，那麼其廣播訊號受建築物阻擋的情形，即可近似於建築物於航線之正投影。

本章節之研究方法是先將城市環境抽象化，把建築物視為隨機分佈的障礙物，並將無人機廣播訊號傳遞的過程是為一個服務系統，其中，無人機飛行所遭遇的建築物可視為不斷朝著無人機迎面而來的顧客，而無人機訊號受阻的時間可被視為使用服務的時間。

為了進行實際的模擬，本研究使用台北市全區範圍以及主要行政區內的真實建築物圖資進行自動化的取樣與系統化的數據分析，這些數據包括建築物的高度、寬度、數量、間距等資訊，最後透過排隊理論的概念框架來進行建模，以精確描述該飛行區域之障礙物分佈。

針對無人機飛行環境的建築物分佈之分析邏輯如圖 3.1 所示，在選定的區域內部標記航線的起點與終點（圖 3.1 中深藍色兩點），再將兩點連成一筆直標記航線（圖 3.1 中藍線），透過與標記航線上的建築物資料進行交集與差集，分別取得「被建築物阻擋之航線」（圖 3.1 中紅色線段部分）與「無建築物阻擋之航線」（圖 3.1 中綠色線段部分）。

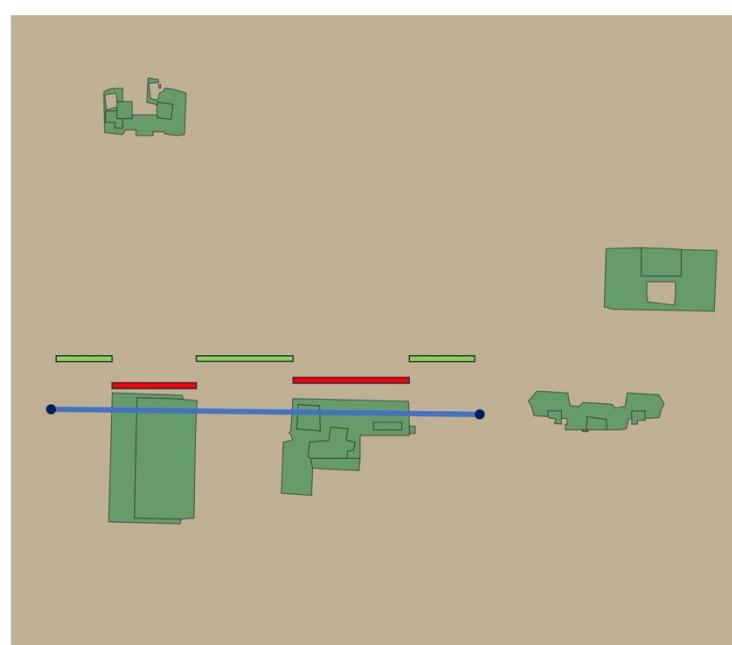


圖 3.1 取得無人機航線行經建築物受阻之數據示意圖

假設有一觀察者位於足夠遠處且垂直於標記航線，無人機沿著平行於標記航線且不會遭遇障礙物的航線飛行，那麼其廣播訊號受建築物阻擋的情形，即可近似於圖 3.1 中紅色線段部分。

透過上述針對實際飛行環境的建物分析後，即可得到建模所需的數據，進而產生相對應的隨高度的環境特徵。而有了這個障礙物分佈的模型後，我們即可根據實際地區的圖資，精確預測該地區的建築物分佈阻擋情況，並據此調整錯誤更正確的參數，從而顯著提升無人機廣播訊號的可靠性。

## 3.1 都會區建物資料

### 3.1.1 原始資料來源

用來建模的資料主要分為建築物資料與行政區劃分資料，建築物的資料來自於台灣大學土木工程學系的高能遙測與城市資訊科學研究中心，透過數值地表模型(Digital Surface Model, DSM)減去數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)得到；而行政區的劃分資料則源自於內政部國土測繪中心在政府資料開放平臺上所提供的資料 [42]。

DSM 為表示地表上所有物體的高度，包括建築物、樹木、橋樑等，可以提供每個點的地表高度，從而構建出包含地表所有特徵的三維地形。DEM 則用來表示地球表面裸露的地形高度，不包括地表上的建築物、植被等其他物體。

### 3.1.2 QGIS 分析流程

QGIS ( Quantum GIS ) 是一款開源且免費的地理資訊系統 ( GIS ) 軟體，提供強大的地理空間分析和數據處理功能。

為了系統化地建立無人機天空飛行時，通訊傳播受建築物阻擋的模型，本研究整合台灣行政區數據和建築物數據，透過 QGIS 內部所提供的 QGIS Model Builder 開發了一個自動化的工作流程，用於計算無人機飛行路徑的總長度、被建築物阻擋的路徑長度以及未被建築物阻擋的路徑長度。具體操作流程如下圖 3.2。

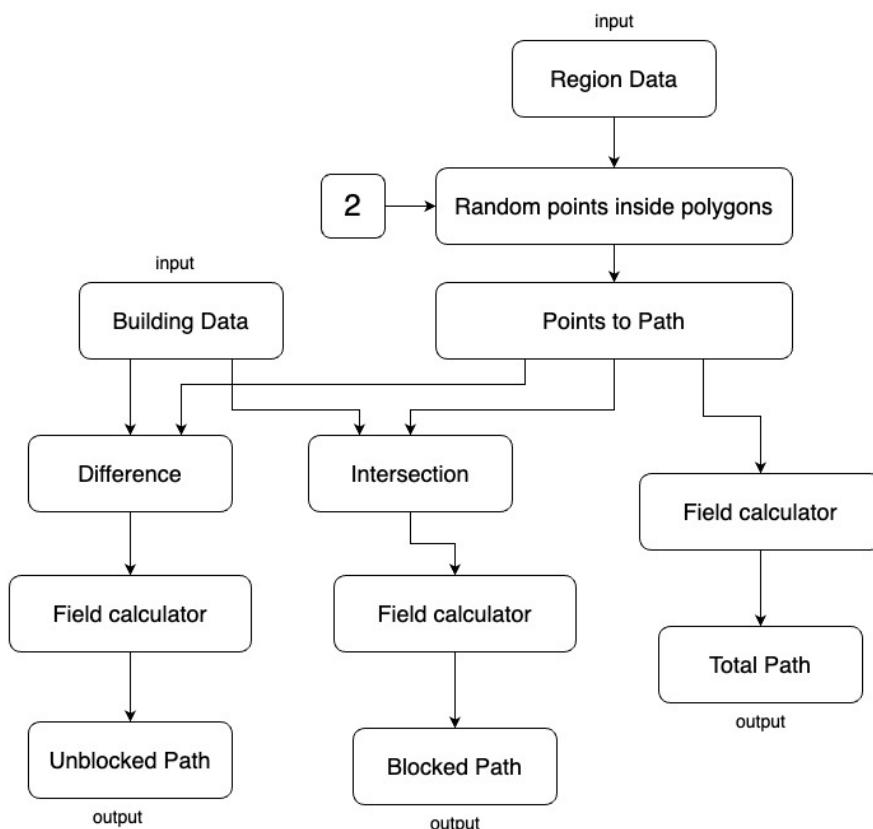


圖 3.2 QGIS 系統化航線障礙物分佈數據取得流程圖

該模型的輸入包括台灣的行政區( Region Data )和建築物資料( Building Data )。首先，通過「Random points inside polygons」工具，在指定區域內生成隨機兩點來確定飛行路徑的起點和終點，然後透過「Points to path」工具，將這些點連接形成飛行路徑。

接下來，通過「Intersection」以及「Difference」工具，分別得到飛行路徑與建築物的相交部分和差異部分，然後再透過「Field Calculator」工具計算長度。最終，

模型會產生無人機飛行路徑的總長度 ( Total Path ) 、被建築物阻擋的路徑長度

( Blocked Path ) 、未被建築物阻擋的路徑長度 ( Unblocked Path ) 等三個輸出結果。

藉由 QGIS 對上述模型的批次化處理 ( Batch Processing )，即可針對選定的待測地區產生大量的航線障礙物分佈之資料。而透過此分析方式批次化處理後所得的資料格式如下( 以大安區高於 45 公尺以上建築物之某筆實際分析資料為例 )：

T1.csv		
Begin	End	Line Length
1	2	2071.978

圖 3.3 無人機飛行路徑的總長度資料格式 ( Tx.csv )

圖 3.3 為無人機飛行路徑的總長度資料格式，該檔案只有一列資料，其「 Line Length 」欄位代表此段飛行路徑的總長度，單位為公尺。

D1.csv		
Begin	End	Line Length
1	2	323.155
1	2	0.858
≈		
1	2	1525.583

圖 3.4 未被建築物遮蔽的路徑長度資料格式 ( Dx.csv )

圖 3.4 為未被建築物遮蔽的飛行路徑長度資料格式，該檔案的每一列資料之「 Line Length 」欄位，即代表在飛行路徑中未經過建築物的每一段間隔距離，單位為公尺。

◎ 圖 3.5

I1.csv							
Begin	End	fid	OBJECTID	x	y	gridcode	Line Length
1	2	10910	277333	121.539	25.031	49	4.926
1	2	11187	283045	121.539	25.0298	47	11.454
≈							
1	2	11369	286925	121.538	25.0292	54	38.491

圖 3.5 被建築物遮蔽的路徑長度資料格式 ( Ix.csv )

圖 3.5 為被建築物遮蔽的飛行路徑長度資料格式，該檔案的每一列資料之「Line Length」欄位，即代表在飛行路徑中經過之建築物的寬度，單位為公尺。

透過以上數據取得之方法以及所得到的資料集，可以進一步為不同地區與不同高度的建築物分佈之環境進行分析。

## 3.2 城市障礙模型分析

QGIS 的批次自動化分析，可以對已經擁有地圖資料的地區進行不同高度航線下的建築物分析，並得出各地區在不同高度下的建築物分佈情形，如下圖 3.6 所示：

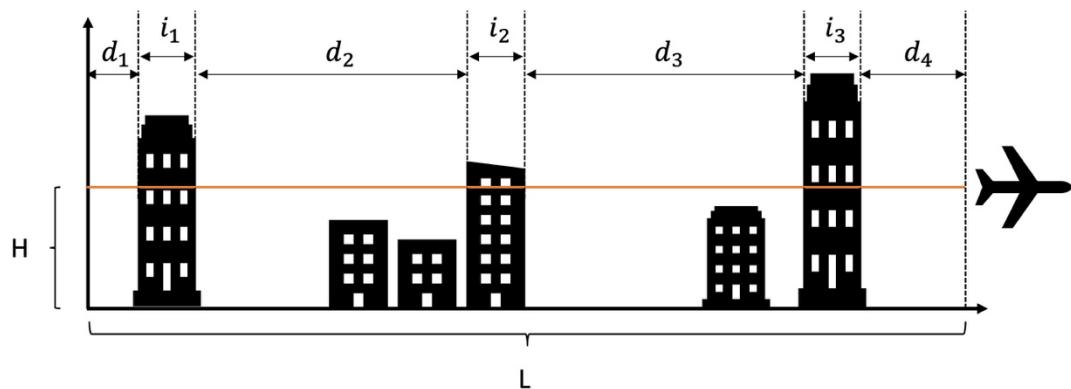


圖 3.6 航線數據生成概念圖

圖 3.6 為透過 QGIS 生成隨機航線數據的概念示意圖，圖中的無人機在特定航

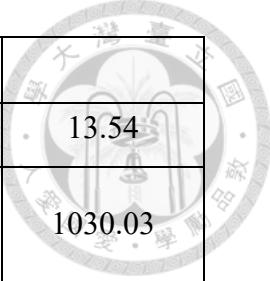
線高度  $H$  (公尺) · 飛行一段總長度為  $L$  (公尺)的航線後 · 其飛行過程一共遭遇 3 棟建築物的阻擋 · 可得到 3 段航線上受建築物遮蔽的線段( $i_1, i_2, i_3$ ) · 與 4 段沒有受建築物遮蔽的線段( $d_1, d_2, d_3, d_4$ )。

則該航線上的建築物數量即為 3 (個) · 該航線上建築物所遮蔽的線段總長度為  $i_1 + i_2 + i_3$  (公尺) · 該航線上沒有建築物遮蔽的線段總長度為  $d_1 + d_2 + d_3 + d_4$  (公尺) · 航線上建築物的平均寬度為  $(i_1 + i_2 + i_3)/3$  · 航線上沒有建築物遮蔽的線段平均長度為  $(d_1 + d_2 + d_3 + d_4)/4$  · 透過受建築物遮蔽的線段總長度除以飛行總長度 · 可得到遮蔽率為  $(i_1 + i_2 + i_3)/L$ 。

以上圖 3.6 的分析邏輯 · 對同一地區重複操作 2000 筆資料後 · 可得出該地區的航線平均數據 · 在針對人口較密集的台北市以及高樓大廈林立的台北市大安區分析後 · 透過資料處理得出上述地區之航線數據 · 如下表 3.1 與表 3.2：

表 3.1 台北市隨機航線生成數據表

航線高度	45(m)	30(m)	20(m)
航線上建築物的平均數量	5.27	12.73	27.91
航線上沒有建築物遮蔽的線段平均數量	6.26	13.70	28.84
航線上建築物所遮蔽線段的平均總長度(公尺)	87.84	220.05	432.26
航線上沒有建築物遮蔽的線段平均總長度(公尺)	9280.77	9166.22	9080.07
航線平均總長度(公尺)	9368.61	9386.26	9512.32
航線上建築物的平均寬度(公尺)	16.66	17.29	15.49
航線上沒有建築物遮蔽的線段	1482.55	669.26	314.83

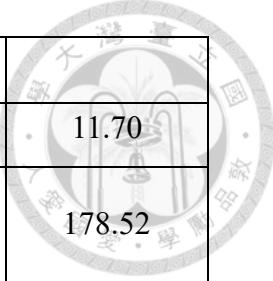


之平均長度(公尺)			
航線上建物的寬度標準差(公尺)	14.49	14.79	13.54
航線上沒有建築物遮蔽的線段之長度標準差(公尺)	2442.45	1618.81	1030.03
平均遮蔽率	0.0094	0.0232	0.0448
有效資料量	2000	2000	2000

由表 3.1 的資料中可以觀察到：「航線上建築物的平均數量」、「航線上沒有建築物遮蔽的線段平均數量」、「航線上建築物所遮蔽線段的平均總長度」隨著飛行高度的下降而顯著增加；「航線上沒有建築物遮蔽的線段平均總長度」、「航線上建築物的平均寬度」隨著飛行高度的下降而些微下降；「航線上沒有建築物遮蔽的線段之平均長度」隨著飛行高度的下降而顯著下降，這些數據說明台北市的建築物密度與飛行高度呈現負相關，也代表著台北市越高的建築物其分佈越稀疏。

表 3.2 大安區隨機航線生成數據表

航線高度	45(m)	30(m)	20(m)
航線上建築物的平均數量	3.23	8.02	18.25
航線上沒有建築物遮蔽的線段平均數量	4.19	8.90	19.00
航線上建築物所遮蔽線段的平均總長度(公尺)	48.94	127.20	268.12
航線上沒有建築物遮蔽的線段平均總長度(公尺)	2064.95	1988.83	1834.03
航線平均總長度(公尺)	2113.88	2116.03	2102.15
航線上建築物的平均寬度(公尺)	15.14	15.87	14.69
航線上沒有建築物遮蔽的線段	492.65	223.53	96.51



之平均長度(公尺)			
航線上建物的寬度標準差(公尺)	12.04	11.58	11.70
航線上沒有建築物遮蔽的線段之長度標準差(公尺)	581.08	330.39	178.52
平均遮蔽率	0.0233	0.0601	0.1285
有效資料量	2000	2000	2000

由表 3.2 的資料中可以觀察到：「航線上建築物的平均數量」、「航線上沒有建築物遮蔽的線段平均數量」、「航線上建築物所遮蔽線段的平均總長度」隨著飛行高度的下降而顯著增加；「航線上沒有建築物遮蔽的線段平均總長度」、「航線上建築物的平均寬度」隨著飛行高度的下降而些微下降；「航線上沒有建築物遮蔽的線段之平均長度」隨著飛行高度的下降而顯著下降，這些數據說明台北市大安區的建築物密度與飛行高度呈現負相關，也代表著越高的建築物其分佈越稀疏。

在綜合比較表 3.1 以及表 3.2 的數據也可以發現：大安區的「航線上沒有建築物遮蔽的線段之平均長度」遠比台北市的數值來的小，尤其是在 45 公尺高度的航線中，說明大安區的高樓（45 公尺以上）分佈較台北市全區範圍來說，明顯多出許多；而考量到台北市的航線平均總長度約為大安區的 4.5 倍左右，因此若以航線平均長度做標準化，則在同樣的飛行高度下，大安區的「航線上建築物的平均數量」、「航線上建築物所遮蔽線段的平均總長度」也相較於台北市全區的資料高出不少（以 45 公尺以上航線高度為例，台北市全區的「航線上建築物的平均數量」、「航線上建築物所遮蔽線段的平均總長度」分別為 5.27、87.84，在對「航線平均總長度」做標準化後，可得到台北市每 1000 公尺飛行距離的「航線上建築物的平均數量」、「航線上建築物所遮蔽線段的平均總長度」分別為 0.56、9.37，而大安區標準

化後的兩數值為 1.52、23.15 )，因此也可以說明在大安區的建築物，特別是高樓層的建物，相較於台北市全區有著更高的密度。

透過以上之數據，可以進一步為不同的建築物分佈之環境進行分析與模擬。



### 3.3 流程設計

本節為介紹無人機透過通訊協定傳播長訊息時，於廣播端與地面接收端之加解密的詳細流程。

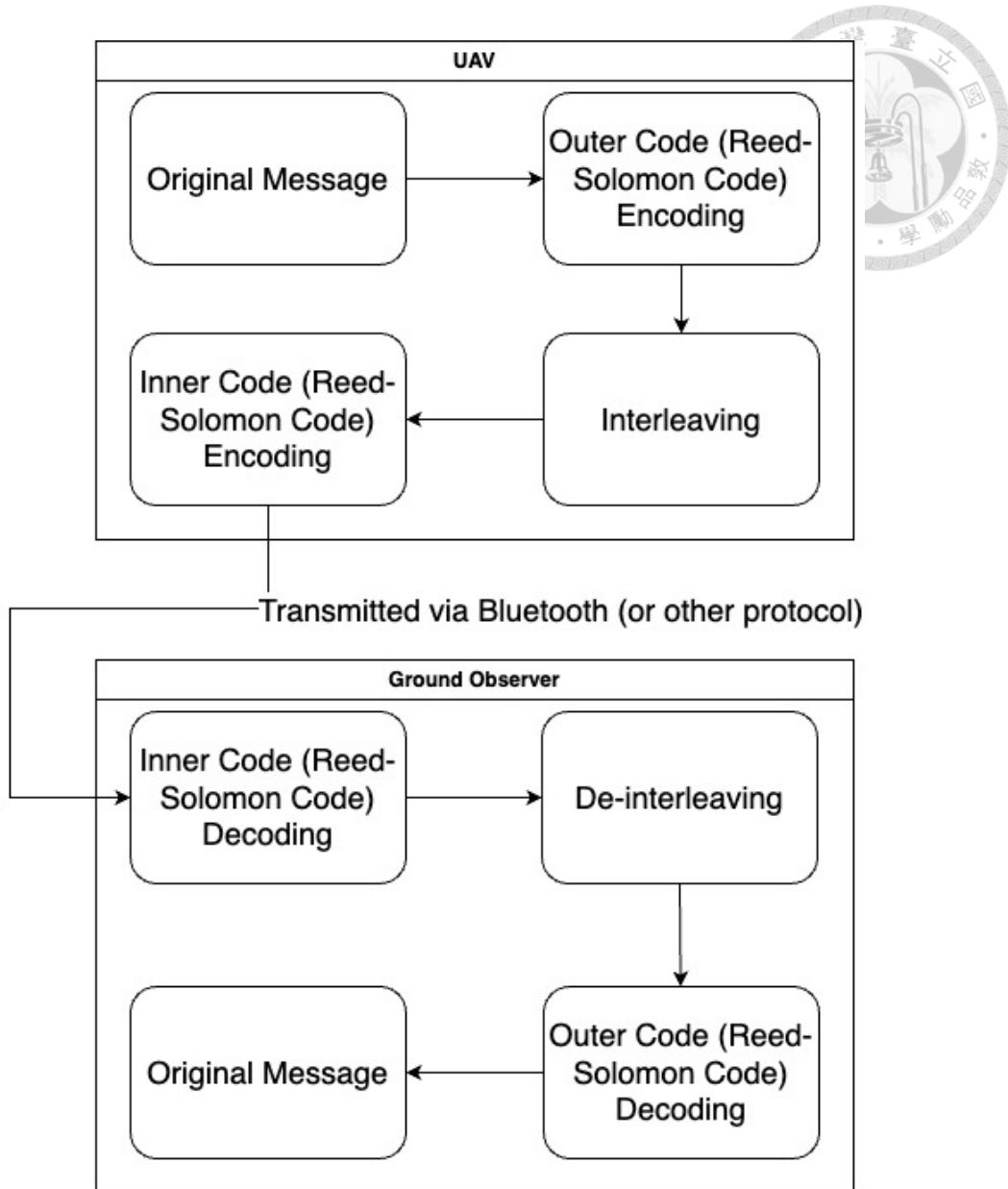


圖 3.7 廣播端與接收端流程圖

圖 3.7 為廣播端與接收端之訊息傳送流程圖，首先，在 UAV 端會先針對原始訊息進行第一次的 Reed-Solomon Code 編碼（外碼），然後通過交錯器進行交錯編碼( Interleaving )的處理，接著再進行第二次的 Reed-Solomon Code 編碼（內碼），最後透過藍牙( 或其他通訊協定 )的廣播模組傳送出去。

而地面接收端在接收到藍牙廣播訊號後，會先對其進行第一次的 Reed-Solomon Code 解碼（內碼），接著進行解除交錯( De-interleaving)的處理，將訊息還

原回未交錯前的狀態，最後進行第二次的 Reed-Solomon Code 解碼（外碼），即完成原始訊息之還原。



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36

圖 3.8 廣播訊息示意圖

圖 3.8 為範例的長訊息。在處理無人機的長訊息廣播時，由於訊息長度會遠大於外碼的  $k$  值，因此需要先針對原本的訊息長度與對外碼的  $k$  值餘下的部分進行填補( Padding )，如圖 3.9 所示。

1	2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	31	32
33	34	35	36	0	0	0	0

圖 3.9 外碼編碼前填補示意圖

圖 3.9 為在編碼前的填補示意圖。本實驗實際操作時選用 PKCS#7 標準進行填補，此處為簡化示意圖，故以 0 作為填補值。

在訊息填補後，即可進行外碼的 RS Code 的編碼，透過調整 RS Code 參數中  $(n_1, k_1)$  的大小，以針對不同的障礙物分佈的區域進行碼率( Code Rate )的調整。如圖 3.10 所示。



1	2	3	4	5	6	7	8	A	B	C	D	E	F	G	H
9	10	11	12	13	14	15	16	I	J	K	L	M	N	O	P
17	18	19	20	21	22	23	24	Q	R	S	T	U	V	W	X
25	26	27	28	29	30	31	32	Y	Z	a	b	c	d	e	f
33	34	35	36	0	0	0	0	g	h	i	j	k	l	m	n

圖 3.10 加入外碼( Reed-Solomon Code ) 編碼後的廣播訊息示意圖

圖 3.10 為加入外碼編碼後的廣播訊息示意圖，圖中以  $(n_1, k_1)$  為  $(16, 8)$  為例。

下一步，需將編碼完的每段碼字以  $\lambda_I$  ( Interleaving Degree ) 交錯成長度  $\lambda_I$  的新訊息組，長度不足的末端需進行填補，如圖 3.11 所示。

1	9	17	25	33	2	10	18
26	34	3	11	19	27	35	4
12	20	28	36	5	13	21	29
0	6	14	22	30	0	7	15
23	31	0	8	16	24	32	0
A	I	Q	Y	g	B	J	R
Z	h	C	K	S	a	i	D
L	T	b	j	E	M	U	c
k	F	N	V	d	I	G	O
W	e	m	H	P	X	f	n

圖 3.11 經過交錯排列後之廣播訊息示意圖

圖 3.11 所示，圖中以  $\lambda_I$  為 8 為例。此範例為剛好整除，因此無需進行填補。

下一步，是針對交錯後的訊息，對內碼的  $k$  值進行填補，如圖 3.12。

1	9	17	25	33	2	10	18	26	34
3	11	19	27	35	4	12	20	28	36
5	13	21	29	0	6	14	22	30	0
7	15	23	31	0	8	16	24	32	0
A	I	Q	Y	g	B	J	R	Z	h
C	K	S	a	i	D	L	T	b	j
E	M	U	c	k	F	N	V	d	l
G	O	W	e	m	H	P	X	f	n



圖 3.12 內碼編碼前填補示意圖

圖 3.12 為內碼編碼前填補示意圖。本步驟實際操作時選用 PKCS#7 標準進行填補，此處為簡化示意圖。此範例為剛好整除，因此無需進行填補。  
在填補完成後，下一步為進行內碼的 RS Code 的編碼，透過調整 RS Code 參數中  $(n_2, k_2)$  的大小，以針對不同的障礙物分佈的區域進行碼率（Code Rate）的調整。如圖 3.13 所示，圖中以  $(n_2, k_2)$  為  $(14, 10)$  為例。

1	9	17	25	33	2	10	18	26	34	A	B	C	D
3	11	19	27	35	4	12	20	28	36	E	F	G	H
5	13	21	29	0	6	14	22	30	0	I	J	K	L
7	15	23	31	0	8	16	24	32	0	M	N	O	P
A	I	Q	Y	g	B	J	R	Z	h	Q	R	S	T
C	K	S	a	i	D	L	T	b	j	U	V	W	X
E	M	U	c	k	F	N	V	d	l	Y	Z	a	b
G	O	W	e	m	H	P	X	f	n	c	d	e	f

圖 3.13 加入內碼( Reed-Solomon Code ) 編碼後的廣播訊息示意圖

圖 3.13 即為加入內碼編碼後的廣播訊息示意圖。由於上一節所討論到關於藍牙封包長度的限制，因此在傳輸長訊息的廣播封包時，會再對編碼後的訊息進行封包長度的分割傳送（此處為通訊協定之第二層處理），並在每段分割內容的標頭檔（Header）上標示出順序，如此，在接收端進行完整的接收後，才能透過每段封包上所標示的順序，將接收到的封包透過拼接的方式還原回來，而在最後的封包不足長度的部分也會進行填補處理。如圖 3.14 所示。



圖 3.14 長訊息廣播分割傳送示意圖

圖 3.14 即為長訊息經過通訊協定（如：藍牙）傳播時，由於封包能夾帶的有效訊息量有限，故需分段傳送的示意圖。圖中以每封包大小為 5 Bytes 為例。若在此廣播訊息傳遞的過程中，遭受到突發錯誤（如：遭遇建築物遮蔽廣播訊號），導致遺失了數段連續的封包，如圖 3.15 所示。



1	9	17	25	33	2	10	18	26	34	A	B	C	D	3
11	19	27	35	4	12	20	28	36	E	F	G	H	5	13
21	29	0	6	14	22	30	0	I	J	K	L	7	15	23
31	0	8	16	24	32	0	M	N	O	P	A	I	Q	Y
g	B	J	R	Z	h	Q	R	S	T	C	K	S	a	i
D	L	T	b	j	U	V	W	X	E	M	U	c	k	F
N	V	d	I	Y	Z	a	b	G	O	W	e	m	H	P
X	f	n	c	d	e	f	0	0	0					

圖 3.15 廣播訊息遭受突發錯誤示意圖

圖 3.15 中遭受連續突發錯誤，以致於共有 6 則廣播封包遺失，在圖中以紫色做代表。

1	9	17	25	33	2	10	18	26	34	A	B	C	D	
3	11	19	27	35	4	12	20	28	36	E	F	G	H	
5	13	21	29	0	6	14	22	30	0	I	J	K	L	
7	15	23	31	0	8	16	24	32	0	M	N	O	P	
A	I	Q	Y	g	B	J	R	Z	h	Q	R	S	T	
C	K	S	a	i	D	L	T	b	j	U	V	W	X	
E	M	U	c	k	F	N	V	d	I	Y	Z	a	b	
G	O	W	e	m	H	P	X	f	n	c	d	e	f	

圖 3.16 訊息重組後示意圖

圖 3.16 為接收端在接收完所有封包後，針對所有封包進行重組，以還原發送端發送的所有訊息之示意圖。圖中的紫色部分為在廣播通訊過程中，被障礙物阻擋

以至於無法傳送的部分，實際過程中應為空白無資料的狀態，此處為了方便說明，顧只以不同顏色做區隔。

由於此範例之內碼 RS Code 的  $(n_2, k_2)$  為  $(14, 10)$ ，具有  $\frac{(n_1-k_1)}{2}$  的錯誤更正能力，可以還原至多 2 個符號的錯誤，同時具備  $(n_1 - k_1)$  擦除（已知錯誤位置）還原能力，可以在已知擦除位置時，還原至多 4 個擦除錯誤。

圖 3.16 在訊息重組後，可以看到由於第三列與第四列碼字當中的遺失部分（紫色部分），已超過此內碼還原能力，因此無法還原。而第五行碼字當中的遺失部分為 4 個 Bytes，由於位置已知且恰好等於此內碼之擦除還原能力，因此可以將其還原，如下圖 3.17 所示。

1	9	17	25	33	2	10	18	26	34
3	11	19	27	35	4	12	20	28	36
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A	I	Q	Y	g	B	J	R	Z	h
C	K	S	a	i	D	L	T	b	j
E	M	U	c	k	F	N	V	d	I
G	O	W	e	m	H	P	X	f	n

圖 3.17 內碼解碼與抹除標記之示意圖

圖 3.17 為經過內碼解碼後的示意圖。圖中紫色部分由於超過內碼單一碼字的還原能力，故無法還原，只能將其標示為擦除，並送入後方的外碼進行進一步的還原。擦除部分在圖中以紫色的 0 作為記號。



由於編碼經過交錯器的處理，使得這些丟失的封包內容，實際上被分散到了外碼的不同碼字中。因此在解碼時，需要再經過一次解除交錯( De-interleaving )的過程，如下圖 3.18 所示。

1	2	3	4	0	0	0	0	A	B	C	D	E	F	G	H
9	10	11	12	0	0	0	0	I	J	K	L	M	N	O	P
17	18	19	20	0	0	0	0	Q	R	S	T	U	V	W	X
25	26	27	28	0	0	0	0	Y	Z	a	b	c	d	e	f
33	34	35	36	0	0	0	0	g	h	i	j	k	l	m	n

圖 3.18 突發錯誤分散之示意圖

圖 3.18 為解除交錯後的訊息示意圖。由於原始訊息在外碼編碼後，有經過交錯器進行交錯編碼，因此在面對大量連續錯誤時，可以將錯誤分散至不同的碼字當中。

以圖 3.18 為例，交錯編碼使得訊息在遭遇即便多組連續封包的遺失，但對於外碼的每組碼字而言，都只分得 4 個符號的遺失。

由於此外碼 RS Code 的  $(n_1, k_1)$  為  $(16, 8)$ ，具有  $\frac{(n_1-k_1)}{2}$  的錯誤更正能力，可以還原至多 4 個符號的錯誤，同時具備  $(n_1 - k_1)$  擦除（已知錯誤位置）還原能力，可以在已知擦除位置時，還原至多 8 個擦除錯誤。

因此就此範例而言，對於每個外碼的碼字，都能夠將經由內碼標示的擦除錯誤還原回原始訊息的全部內容。



## Chapter 4 編碼應用與模擬

由於廣播訊息在發送的過程當中，很有可能會因為物理上的阻隔或是物體因為移動而超出接收範圍所導致的訊息遺失，進而導致接收端無法收到正確的完整訊息。因此，為了解決這個問題，本研究決定以串聯碼( Concatenated Code )的概念，使用交錯編碼( Interleaving Code )搭配兩層的錯誤更正碼來解決訊息遺失的問題。

在錯誤更正碼的部分，本研究選用的是里德-所羅門碼( Reed-Solomon Code, RS Code )，由於其算法已經被研究與使用幾十年，具有非常高的成熟性與穩定性，並且 RS Code 的適應性強，能夠根據需要調整大小和更正能力，以應對各種不同的錯誤率與傳輸條件。

表 4.1 常用名詞解釋

名詞代稱	名詞解釋
碼字 ( codeword )	透過錯誤更正碼編碼後，所得到的編碼訊息單位
位元 ( Byte )	為訊息傳遞過程中，組成有意義文字的最小單位
封包 ( Packet )	為網路通訊中，每次用來獨立傳輸的訊息傳送單位
符號 ( Symbol )	為表示在數據傳輸或儲存的過程中所使用的基本單位，可以為 0、1 或是一個或多個 Bits，具體依照當下使用的編碼系統而定。

表 4.1 為本章內常用到之名詞解釋。



## 4.1 藍牙廣播的傳輸限制

本小節主要探討在透過藍牙廣播訊息的過程中，由於藍牙規範本身所造成的限制。考量到目前市面上絕大多數的行動裝置皆具備藍芽功能，然而不見得所有裝置的藍牙版本皆為 Bluetooth 5，且 Bluetooth 5 具有向下兼容 Bluetooth 4 的特性，因此本研究採用 Bluetooth 4 作為模擬的藍牙版本，而以下關於藍牙的傳輸限制也只針對 Bluetooth 4。

在藍牙的鏈路層有明確定義其傳送的封包格式 [44]，如圖 4.1(a)所示。其中包含：

1. 前導碼 ( Preamble )：1 個八位位元組 ( Byte )，用於同步，使接收器能夠確定數據傳輸的速度和開始。
2. 訪問地址 ( Access Address )：4 個八位位元組，標識此封包的目的地，以確保數據能夠正確路由。
3. 協議數據單元 ( PDU )：長度為 2 至 39 個八位位元組，包含實際傳輸的數據。
4. 循環冗餘校驗 ( CRC )：3 個八位位元組，用於檢測在傳輸過程中是否有任何錯誤發生。

其中，PDU 的部分又可以被拆解成共 16 位元的標頭 ( Header ) 以及根據標頭中的長度字段確定大小的有效負載 ( Payload )，如圖 4.1(b)所示。

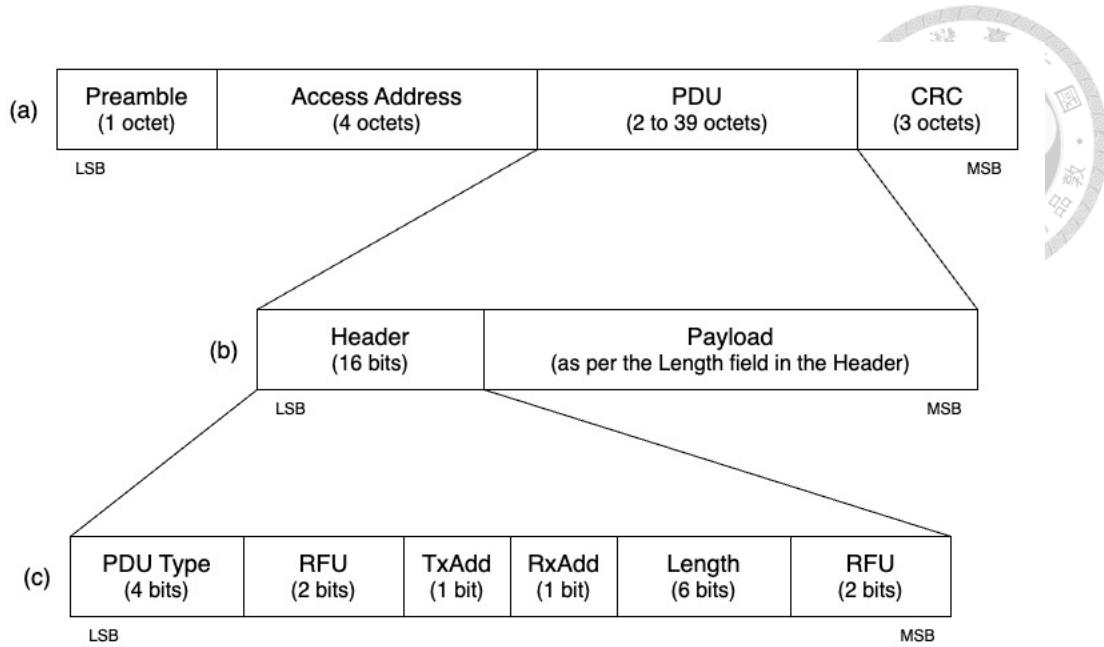


圖 4.1 藍牙鏈路層封包和廣播通道協議數據單元 ( PDU ) 之結構 [44]

而 PDU 的標頭又可以再細分為如圖 4.1(c)所示。其中包含：

1. PDU 類型 ( PDU Type )：4 位元，定義了 PDU 的功能類型。
2. RFU ( Reserved for Future Use )：2 位元，留作未來使用。
3. TxAdd ( Transmitter Address Type )：1 位元，指示發送者地址是公共還是隨機。
4. RxAdd ( Receiver Address Type )：1 位元，指示接收者地址是公共還是隨機。
5. 長度 ( Length )：6 位元，指示 PDU 的長度，不包括標頭部分。
6. RFU ( Reserved for Future Use )：2 位元，用於未來可能的擴展。

在鏈路層中定義了 7 種關於 Advertising PDU 的類型，如表 4.2 所示。

表 4.2 Advertising channel PDU 類型 [14]

PDU Type	Packet Name	PDU Format (Payload)
0000	ADV_IND	AdvA(6 Bytes)、AdvData(0-31 Bytes)
0001	ADV_DIRECT_IND	AdvA(6 Bytes)、InitA(6 Bytes)

0010	ADV_NONCONN_IND	AdvA(6 Bytes)、AdvData(0-31 Bytes)
0011	SCAN_REQ	ScanA(6 Bytes)、AdvA(6 Bytes)
0100	SCAN_RSP	AdvA(6 Bytes)、ScanRspData(0-31 Bytes)
0101	CONNECT_REQ	InitA(6 Bytes)、AdvA(6 Bytes)、LLData(22 Bytes)
0110	ADV_SCAN_IND	AdvA(6 Bytes)、AdvData(0-31 Bytes)

表 4.2 為藍牙核心文檔中所定義的 7 種廣播行為與其對應的 PDU 格式規範。其對應到的是圖 4.1(c)中的 PDU Type，藉由不同的 PDU Type 規範，決定此封包可攜帶的有效負載上限，如表 4.2 當中的 PDU Format 欄位所示。

由於無人機在空中所使用的廣播方式為非連結非指向的廣播，因此參照表 4.2 當中 PDU Type 為 0010 的 ADV\_NONCONN\_IND，其在扣除長度為 6 個八位位元組的廣告者地址 ( AdvA ) 後，實際上可用來傳送廣播內容 ( AdvData ) 的大小為 0 到 31 個八位位元組。

## 4.2 編碼參數之模擬流程

在給定特定區域的地圖資料後，透過 QGIS 的自動化隨機選取過程，可以取得該地區之無人機飛行航線的資料集。而本小節的重點即在於該如何透過此航線資料集，以系統化的流程進行模擬，得出針對不同地區與飛行高度之最適合的編碼參數組。

而為了進行參數選擇的模擬，首先需要先計算飛行的總時間，可以透過讀取航線總距離的檔案 ( Tx.csv ) 以及除以無人機的飛行速度 ( UAV's Speed ) 取得，如圖

4.2。

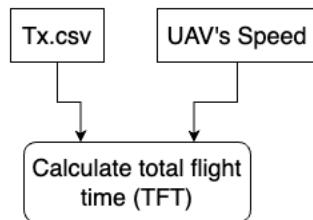


圖 4.2 計算飛行總時間流程圖

接著需要構建飛行路徑上的建築物之分佈情況圖，如圖 4.3：

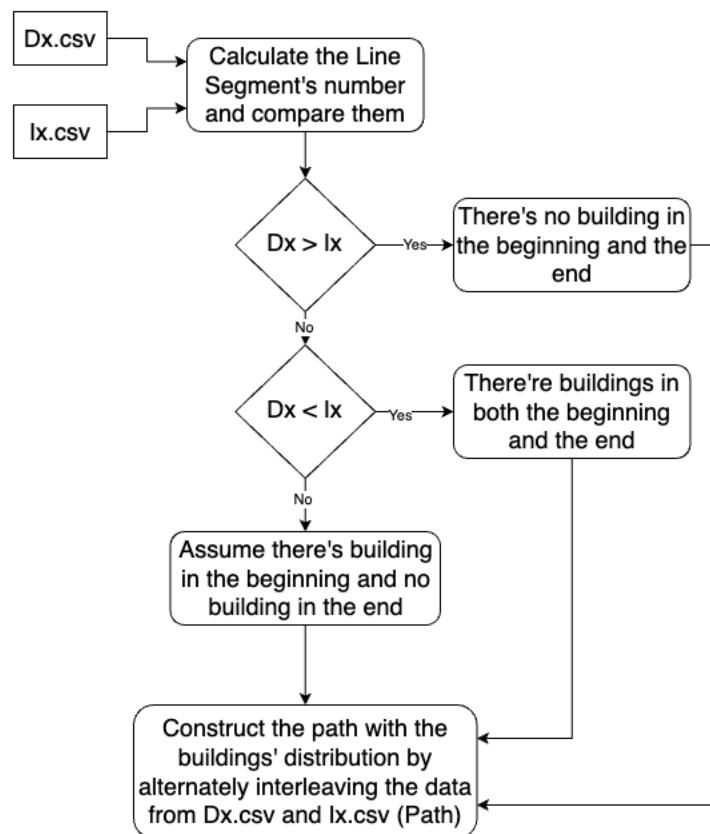


圖 4.3 構建路徑上建築物分佈之流程圖

圖 4.3 為構建路徑上建築物分佈的流程圖。首先，需要先分別計算位於航線與建築物交集線段 (Ix.csv) 的數量以及航線上沒有建築物之線段 (Dx.csv) 的數量，然後比較兩者之間的線段數量多寡。若航線上沒有建築物之線段多於建築物交集線段，則代表在航線的開頭與結尾都是沒有建築物的線段；若航線上與建築物交集

線段多於沒有建築物之線段，則代表在航線的開頭與結尾都是有建築物的線段；若兩者的數量相等，則假設在航線的開頭是有建築物的，而結尾則沒有建築物。

在進行完航線開頭與結尾的建築物有無之判定後，則可按照兩者檔案中的順序，依序交錯排列，從而得出該航線的建築物分佈情況（Path）。

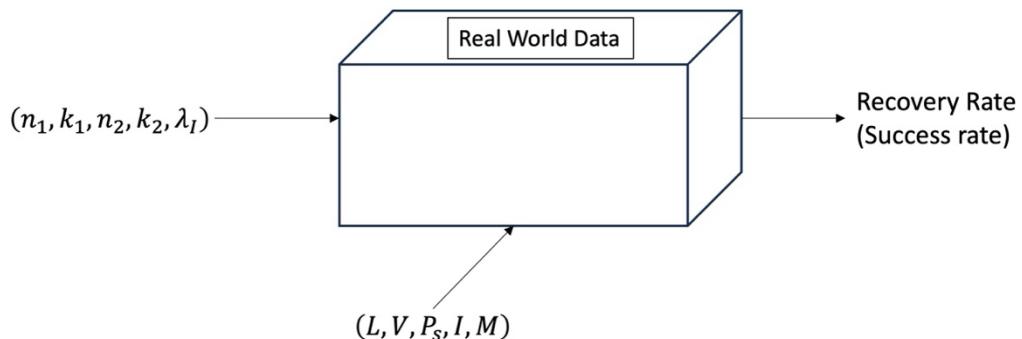


圖 4.4 編碼參數模擬示意圖

圖 4.4 為編碼參數的模擬示意圖，在取得由真實世界地圖資料轉換的航線數據集（圖 4.3 中最後得出的 Path）後，透過給定飛行航線總距離（L）、無人機飛行速率（V）、通訊協議之廣播封包有效負載上限（ $P_s$ ）、廣播封包之傳輸間隔時間（I）、訊息總長度（M），進而針對不同的參數組（ $n_1, k_1, n_2, k_2, \lambda_I$ ）區間進行網格搜索模擬，透過遍歷區間內參數的所有排列組合，得出在特定區域與飛行高度，對於每組參數組所對應的平均訊息接收成功率。

此處的平均訊息成功率的定義為：對於每組參數組，在現有地圖資料所生成的航線資料（每地區 2000 筆資料）中，無人機以固定間隔時間，於一段具有建築物阻隔之固定長度的飛行航線上，分段發送一則編碼後之長訊息，接收端能夠完整解

碼出原始長訊息的次數，佔該地區所有航線資料總數的比例。



## 4.3 選擇最佳化參數

本節將進一步說明透過上一小節的模擬流程，如何針對每個不同的飛行環境進行模擬，進而針對不同的飛行環境選擇最適當的編碼參數組。

### 4.3.1 模擬參數設定

本研究所選用的 Reed-Solomon code 作用於  $GF(2^8)$  之有限體上，對應於現今常 用之 8 位元數位通訊系統。而用以廣播之數位通訊協議選用為藍牙 4 架構，對應 於現今各國 Remote ID 皆廣泛支援之協定架構。廣播封包傳輸間隔時間為 1 秒，對 應 FAA 所規範之 Remote ID 傳輸間隔時間。

表 4.3 模擬之控制參數設定對照表

參數名稱	參數設定
飛行航線總距離( L )	1000 (m)
無人機飛行速率( V )	5 (m/s)
通訊協議之廣播封包有效負載上限( $P_s$ )	25 (Bytes)
廣播封包之傳輸間隔時間( I )	1 (s)
訊息總長度( M )	750 (Bytes), 1250 (Bytes)

表 4.3 為本模擬研究所選用的控制參數設定，其中 L 設定在 1000 公尺為無人 機於各行政區範圍內之合理的直線飛行距離；V 設定在 5 公尺每秒則為一常見的 無人機飛行速度； $P_s$  設定為 25 Bytes 則為藍牙 4 廣播封包在扣除 Remote ID 規範必

要之標頭檔後，所剩餘的有效附載上限；M 選用 750 Bytes 以及 1250 Bytes 則分別對應中等長度與高等長度之訊息傳送。



表 4.4 模擬之編碼參數設定區間對照表

參數名稱	參數設定
外碼之 RS Code 參數 $n$ ( $n_1$ )	255
外碼之 RS Code 參數 $k$ ( $k_1$ )	27 – 253
交錯碼之深度 ( $\lambda_I$ )	2, 4, 8, 16, 32
內碼之 RS Code 參數 $n$ ( $n_2$ )	25
內碼之 RS Code 參數 $k$ ( $k_2$ )	11 - 23

表 4.4 為本模擬研究所選用的編碼參數設定區間，其中  $n_1$  設定在 255 為 Reed-Solomon Code 設定在  $GF(2^8)$  之有限體上所能達到最大值； $k_1$  取 27 到 253，是以 0.1 左右之碼率 ( $\frac{k_1}{n_1}$ ) 到  $n_1 - 2$ ，間隔為 2，為求最大化覆蓋潛在的有效參數； $\lambda_I$  取 2、4、8、16、32 為常見的交錯碼深度； $n_2$  設定在 25 為對應選用之廣播封包有效負載上限 ( $P_s$ )； $k_2$  取 11 到 23 的區間，是以大致一半左右之碼率 ( $\frac{k_2}{n_2}$ ) 到  $n_2 - 2$ ，間隔為 2，為求最大化覆蓋潛在的有效參數。

在  $GF(2^8)$  的架構下，參數  $n_1$  與  $n_2$  理論上可取任意小於  $2^8$  的值。考量實驗時間因素，本研究選擇以  $n_1 = 255$ 、 $n_2 = 25$  作為合理的代表設定。

### 4.3.2 網格搜尋

由於本模擬研究所選用之模擬參數區間範圍跨度相當大，因此若要針對所有

潛在的參數區間範圍進行窮舉，將需要耗費相當大的運算資源與時間。為此，本研究採用分段式的網格搜索來進行模擬。首先針對表 4.4 所列出的編碼參數區間，採用較大的網格( $k_1$ 與 $k_2$ 的區間範圍，間隔為 4)進行搜索，接著在針對大網格搜索出來的結果中，選取表現較好的區間範圍(可透過訊息接收成功率之熱力圖，選取色階排序最靠前之區域範圍)，進行密集網格的二次搜索。透過這樣的方法，能夠有效減少對於無效參數模擬所產生的運算資源與時間的浪費，並且取得近乎同等效果的模擬結果。

此模擬的計算負擔龐大，且單次模擬的執行時間受多個因素動態影響，因此難以進行精確的時長估計。其中影響運算時間的因素包括：碼率、訊息總長度、建築遮蔽率。

碼率較低意味著更強的錯誤更正能力，但同時也因為解碼過程更為複雜，導致運算時間增加；訊息總長度越長，代表系統需要處理更長的訊息，因此也需要更多的計算資源；建築遮蔽率越高，則在模擬中需要有更多的計算處理，因此運算時間也會增加。

本研究在各地區以 2000 筆真實地圖資料所產生之飛行航線作為評估基準。在 Apple M4 Pro 處理器上，單一參數組所需的計算時間根據前述因素，介於 3 秒至 95 秒之間。作為硬體性能對照，若在處理器為 AMD Ryzen 7 2700x 的桌上型電腦執行相同模擬任務，所需時間約為前述硬體的三倍。

在實作上，本研究使用 Python 語言並嘗試透過 concurrent.futures 函式庫進行平行加速。然而由於各參數組的運算時間差異極大導致負載平衡不易，因此平行化帶來的整體加速效果有限。此為未來可持續優化的方向。

透過分段式網格搜索，可以將每次的網格搜索參數組合限縮在 1000 至 2000 組

參數組合。根據模擬經驗，在 Apple M4 Pro 處理器上執行一次大範圍的大網格搜索約需 4 至 8 小時，而執行一次小範圍的精細網格搜索則約需 1 至 4 小時。

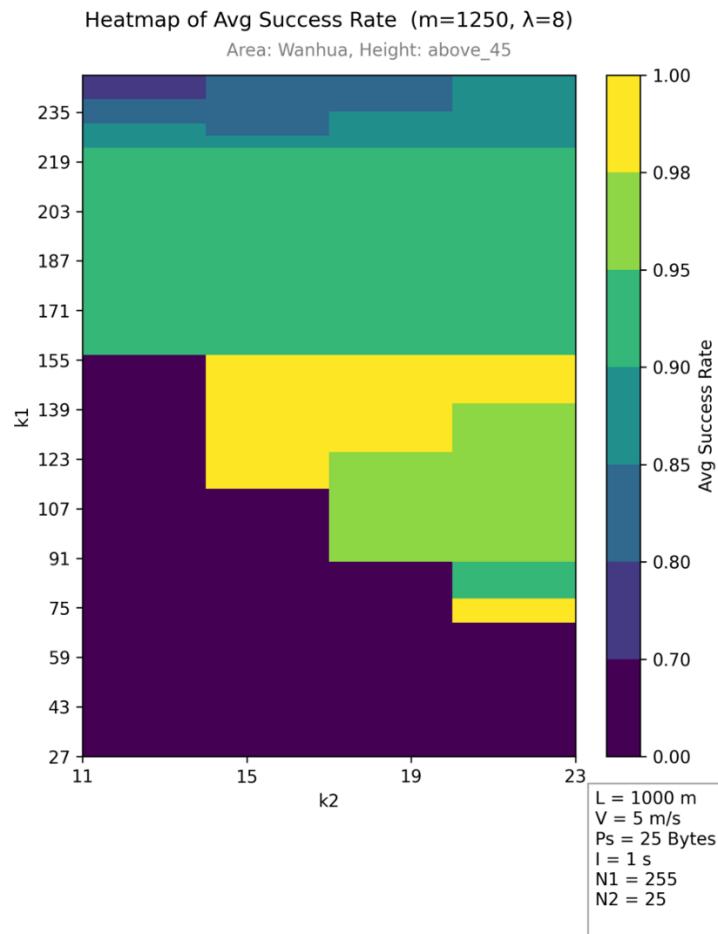


圖 4.5 萬華區 45 公尺飛行高度之訊息接收成功率熱力圖( $M = 1250$  Bytes)

圖 4.5 為針對萬華區 45 公尺飛行高度，訊息總長度為 1250 Bytes，在交錯碼深度為 8 時，模擬產生的訊息接收成功率之熱力圖，此為網格大小為 4 之大網格所產生的結果，即針對  $k_1$  與  $k_2$  的區間範圍，步長為 4。

從圖中可以觀察到，在  $k_1$  為 71 到 155 左右， $k_2$  為 15 到 23 左右，都有相當不錯的接收成功率。因此，在結合其他同地區、同飛行高度、同訊息總長度、不同交錯碼深度之模擬結果，在第二次網格搜索時，即可針對這些表現較好的參數區間，

進行更精確的搜索。

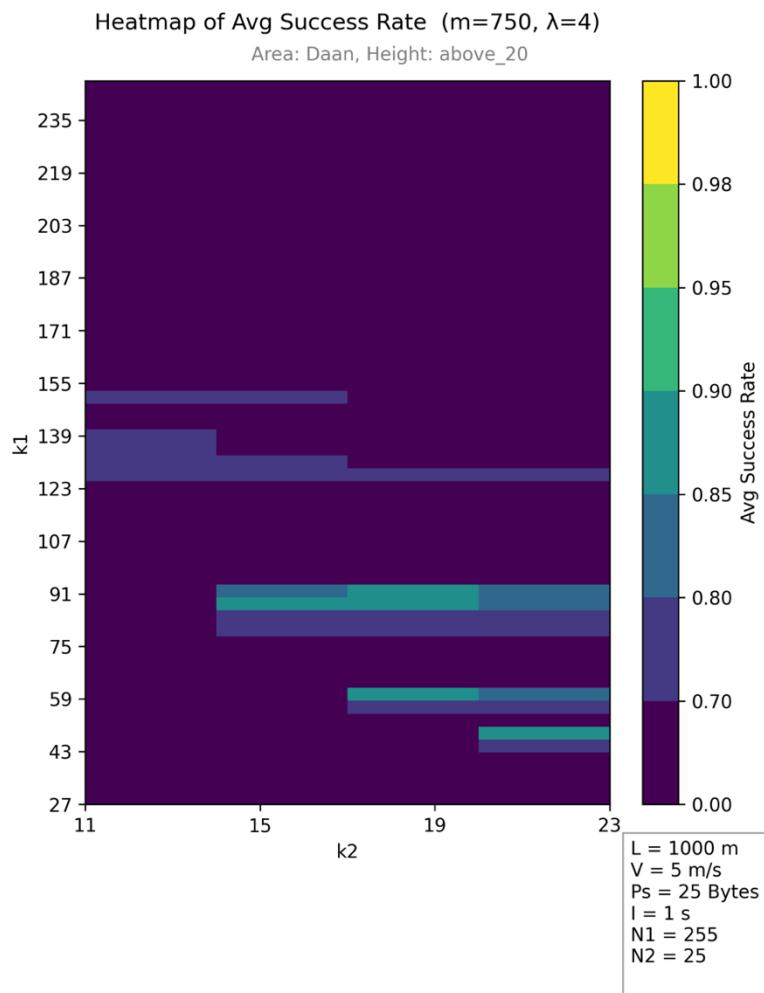


圖 4.6 大安區 20 公尺飛行高度之訊息接收成功率熱力圖( $M = 750$  Bytes)

圖 4.6 為針對大安區 20 公尺飛行高度，訊息總長度為 750 Bytes，在交錯碼深度為 4 時，模擬產生的訊息接收成功率之熱力圖，此為網格大小為 4 之大網格所產生的結果，即針對  $k_1$  與  $k_2$  的區間範圍，步長為 4。

從圖中可以觀察到，在  $k_1$  為 43 到 91 左右， $k_2$  為 15 到 23 左右，都有著相對不錯的接收成功率。因此，在結合其他同地區、同飛行高度、同訊息總長度、不同交錯碼深度之模擬結果，在第二次網格搜索時，即可針對這些表現較好的參數區間，

進行更精確的搜索。

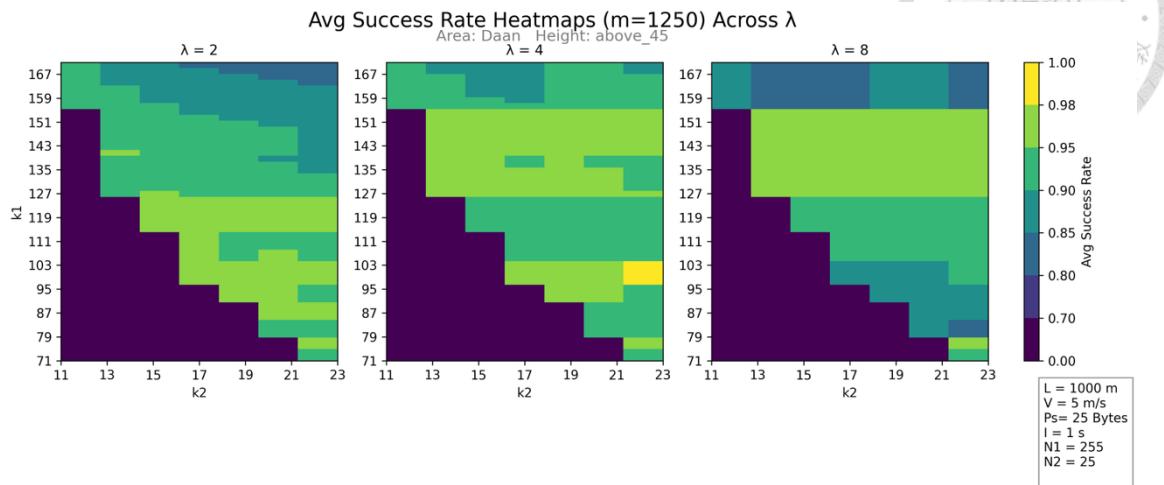


圖 4.7 大安區 45 公尺飛行高度之訊息接收成功率熱力圖對比( $M = 1250$  Bytes)

圖 4.7 為針對大安區 45 公尺飛行高度，在訊息總長度為 1250 Bytes 時，針對交錯碼深度為 2、4、8 的熱力圖對比。此為在第一次大網格搜索的基礎上，進一步精確檢索的二次網格搜索之結果。

從圖 4.5 至圖 4.7，可以看到許多深紫色區域，其代表意義為成功率低於 70% 的參數組區域，而其中有許多參數組模擬出的成功率為 0，其原因為本模擬環境的邊界條件所致。如表 4.3 所設，在給定飛行總距離為 1000 公尺，無人機飛行速度為 5 公尺/秒，通訊協議之廣播封包有效負載上限為 25 Bytes，廣播封包之傳輸間隔時間為 1 秒的邊界條件下，無人機在一趟飛行任務中，實際能傳送的總訊息上限如下式 4.1：

$$\frac{L}{V \times I} \times P_s = \frac{1000(m)}{5(m/s) \times 1(s)} \times 25(Bytes) = 5000 (Bytes) \quad (4.1)$$

使用串聯碼進行傳遞時，若在內碼及外碼添加過多的冗餘，導致其需傳送的總訊息量超過模擬環境中所設立的邊界條件，則會發生訊息無法完整傳遞的狀況。因此，雖然在編碼中加入更多的冗餘，能夠有效對抗更大量的訊息丟失，然而由於邊



界條件存在的緣故，冗餘的設計必須有所節制。

以圖 4.7 當中的參數組為例，若要避免編碼參數設計過多冗餘，則需確保  $k_1$  與  $k_2$  符合以下判斷式 4.2：

$$\frac{k_1}{n_1} \times \frac{k_2}{n_2} \times 5000(\text{Bytes}) \geq 1250(\text{Bytes}) \quad (4.2)$$

其中，5000 (Bytes)為式 4.1 所得之實際能傳送的訊息上限；1250 (Bytes)為圖 4.7 當中的訊息總長度 M。依據表 4.4， $n_1$  設定在 255， $n_2$  設定在 25，將其值代入式 4.2，並進一步化簡，可得到下式 4.3：

$$k_1 \times k_2 \geq 1593.75(\text{Bytes}) \quad (4.3)$$

考慮編碼通過交錯器打散排列後，需要補零的位元數不固定，因此實際上  $k_1 \times k_2$  的值會略大於式 4.3 當中所計算的數值。

在將模擬結果，去除掉因無法傳送完整訊息導致之成功率為零的參數組後，可以得到更明顯的成功率變化比較圖，如下圖 4.8。

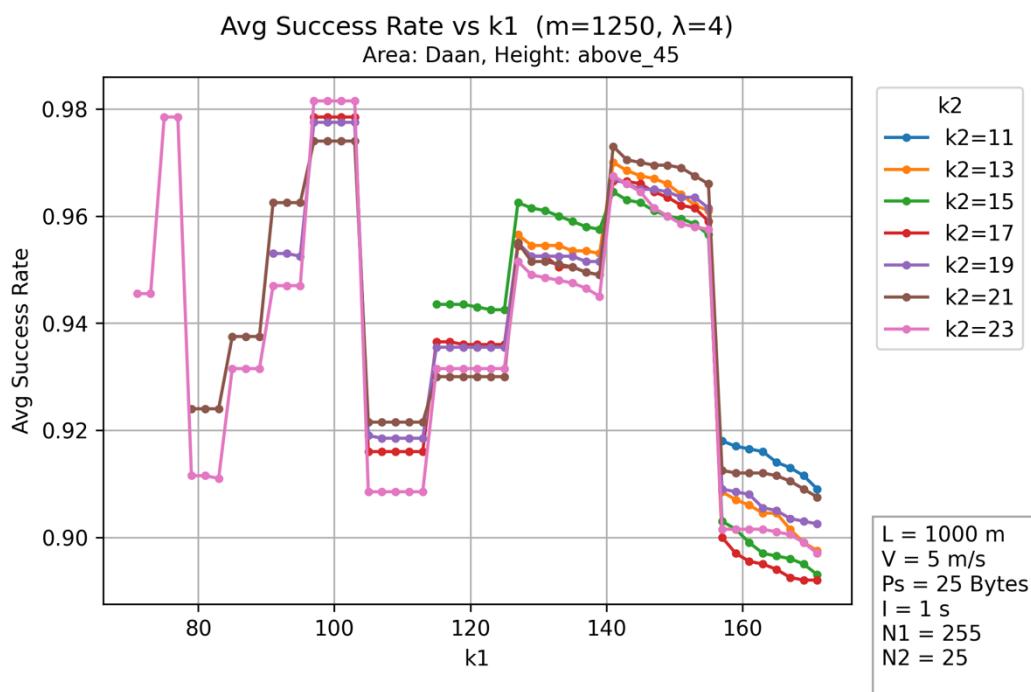


圖 4.8 大安區 45 公尺飛行高度之  $k_1$  對訊息接收成功率折線圖(M=1250)

圖 4.8 為針對大安區 45 公尺飛行高度，在訊息總長度為 1250 Bytes、交錯碼深度為 4 時，針對不同的  $k_2$  所產生的  $k_1$  對訊息接收成功率之折線圖。此為在第一次大網格搜索的基礎上，進一步精確檢索的二次網格搜索，且去除掉成功率為零的參數模擬結果。

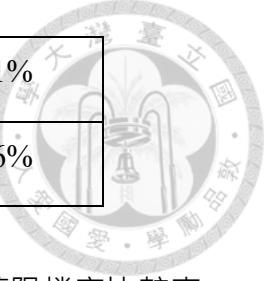
由於在第一次搜索後，可以過濾掉大部分不適合的參數區間，因此在較小的參數範圍中，即可透過小網格來篩選出合適的參數。以圖 4.7 以及圖 4.8 的飛行環境為例，可以觀察到：大安區 45 公尺飛行高度、訊息總長度為 1250 Bytes 時，在  $n_1 = 255$ 、 $k_1 = 97 \sim 103$ 、 $\lambda_l = 4$ 、 $n_2 = 25$ 、 $k_2 = 23$  時，皆有著最好的訊息接收成功率( 98.1% )。

### 4.3.3 模擬結果與比較

由於本模擬為針對不同之飛行環境會產生相對應的編碼參數，本小節為比較在不同地區與飛行高度所產生的模擬結果。以下的模擬結果皆採用 4.3.1 的參數設定以及 4.3.2 的二次網格搜索所得。

表 4.5 台北市全區與各行政區之建築阻擋率比較表

	20 公尺	30 公尺	45 公尺
台北市全區	4.48%	2.32%	0.9%
大安區	12.85%	6.01%	2.33%
中正區	10.5%	5.51%	2.32%
松山區	9.19%	4.9%	1.9%
大同區	8.93%	4.57%	1.5%
中山區	8.54%	4.3%	1.51%



信義區	7.66%	4.23%	1.51%
萬華區	6.38%	3.06%	0.86%

表 4.5 為在台北市全區與行政區不同飛行高度之航線上的建築阻擋率比較表，此表依據真實地圖資料，結合 GIS 分析後所得。本表未統計士林北投區，是由於該區包含台北市大部分山區，整體建築物密度相對較低。而使用台北市全區進行航線圖資生成時，很容易會包含到山區、河濱等建築稀少的地區。因此在本表中，台北市全區的建築物遮蔽率低於其他行政區。

表中可以看出大安區為台北市當中建築最密集的地區，而萬華區則為建築物分佈最稀疏的地區。因此以下模擬結果，將著重討論萬華區與大安區這兩者建築物分佈差異最大的地區，其在不同飛行高度下的最佳參數組之差異。

表 4.6 未編碼之訊息接收成功率對照表

飛行環境	成功率	飛行環境	成功率
大安區 20m (M=750Bytes)	35.4%	萬華區 20m (M=750Bytes)	62.15%
大安區 20m (M=1250Bytes)	25.55%	萬華區 20m (M=1250Bytes)	50.5%
大安區 45m (M=750Bytes)	82.85%	萬華區 45m (M=750Bytes)	92.9%
大安區 45m (M=1250Bytes)	75.9%	萬華區 45m (M=1250Bytes)	87.95%

表 4.6 為無人機於未編碼情況下，在大安區與萬華區 20、45 公尺飛行高度，訊息總長度為 750、1250 Bytes 時，透過模擬所得到的訊息接收成功率之對照表。

在 45 公尺的飛行高度時，由於建築物分佈較稀疏，因此雖然沒有使用編碼機制，依舊可以獲得七成以上的訊息接收成功率。然而，若飛行高度只有 20 公尺，

則即使在建築物分佈最稀疏的萬華區，其訊息接收成功率也只剩下五至六成；在建築物分佈最密集的大安區，其訊息接收成功率則只有兩成至三成。



表 4.7 推薦參數對照表

飛行環境	最佳參數組	成功率
大安區 20m (M=750Bytes)	$k_1 = 45 \sim 47$ 、 $\lambda_I = 8, 16$ 、 $k_2 = 23$	88.05%
大安區 20m (M=1250Bytes)	$k_1 = 75 \sim 77$ 、 $\lambda_I = 16$ 、 $k_2 = 23$	88.05%
大安區 45m (M=750Bytes)	$k_1 = 71 \sim 75$ 、 $\lambda_I = 2$ 、 $k_2 = 15 \sim 17$	98.15%
大安區 45m (M=1250Bytes)	$k_1 = 97 \sim 103$ 、 $\lambda_I = 4$ 、 $k_2 = 23$	98.1%
萬華區 20m (M=750Bytes)	$k_1 = 85 \sim 93$ 、 $\lambda_I = 8$ 、 $k_2 = 15$	94.3%
萬華區 20m (M=1250Bytes)	$k_1 = 75 \sim 77$ 、 $\lambda_I = 4, 8, 16$ 、 $k_2 = 23$	94.45%
萬華區 45m (M=750Bytes)	$k_1 = 109 \sim 125$ 、 $\lambda_I = 2$ 、 $k_2 = 15$ $k_1 = 85 \sim 93$ 、 $\lambda_I = 4$ 、 $k_2 = 13$ $k_1 = 85 \sim 93$ 、 $\lambda_I = 8$ 、 $k_2 = 13$	99.5%
萬華區 45m (M=1250Bytes)	$k_1 = 141 \sim 155$ 、 $\lambda_I = 8$ 、 $k_2 = 13$	99.5%

表 4.7 為針對台北市大安區與萬華區之不同飛行高度與訊息總長度的推薦參數對照表，表中分別為在不同飛行環境下，透過模擬所得出的最佳參數組與其模擬出的對應訊息接收成功率。其中大安區、20 公尺飛行高度與訊息總長度為 1250Bytes 皆為相對較困難的飛行環境（會遭遇的訊息阻隔機率較大）。而在萬華區、飛行高度為 45 公尺、訊息總長度為 750 Bytes 時，由於其所遭遇的訊息阻隔較少，因此對於此飛行環境有多組參數組合皆可達到 99.5% 的訊息接收成功率。

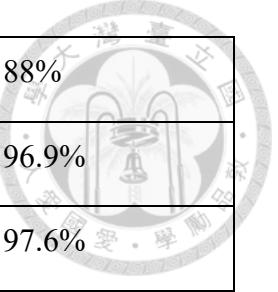
表 4.8 編碼前後之訊息接收成功率對照表

飛行環境	未編碼成功率	編碼後成功率	增幅
大安區 20m (M=750Bytes)	35.4%	88.05%	+52.65%
大安區 20m (M=1250Bytes)	25.55%	88.05%	+62.5%
大安區 45m (M=750Bytes)	82.85%	98.15%	+15.3%
大安區 45m (M=1250Bytes)	75.9%	98.1%	+22.2%
萬華區 20m (M=750Bytes)	62.15%	94.3%	+32.15%
萬華區 20m (M=1250Bytes)	50.5%	94.45%	+43.95%
萬華區 45m (M=750Bytes)	92.9%	99.5%	+6.6%
萬華區 45m (M=1250Bytes)	87.95%	99.5%	+11.55%

表 4.8 為大安區與萬華區在有進行編碼與完全無編碼下的訊息接收成功率對照表。可以發現，在飛行高度為 45 公尺的地區，由於建築物分佈較稀疏，因此即使未進行編碼，其訊息接收成功率亦相對較高，然而透過加入本研究所提出之編碼機制，可對訊息接收之成功率有明顯的提高(+6.6% 至 +22.2% 的增幅)；在飛行高度為 20 公尺的地區，由於建築物分佈較密集，因此若未進行編碼，其訊息接收成功率顯著偏低，而透過本研究所提出之編碼機制可以顯著提升其訊息接收之成功率(+32.15% 至 +62.5% 的增幅)，由此即可證明本研究之編碼機制，於建築物分佈較密集的飛行環境，具有顯著的效果。

表 4.9 萬華區最佳參數於同環境之大安區訊息接收成功率對照表

大安區飛行環境	萬華區同環境之最佳參數組	成功率
大安區 20m (M=750Bytes)	$k_1 = 85$ 、 $\lambda_I = 8$ 、 $k_2 = 15$	86.8%



大安區 20m (M=1250Bytes)	$k_1 = 75$ 、 $\lambda_I = 16$ 、 $k_2 = 23$	88%
大安區 45m (M=750Bytes)	$k_1 = 117$ 、 $\lambda_I = 2$ 、 $k_2 = 15$	96.9%
大安區 45m (M=1250Bytes)	$k_1 = 149$ 、 $\lambda_I = 8$ 、 $k_2 = 13$	97.6%

表 4.9 比較了大安區在不同高度與訊息長度下，採用萬華區最佳參數組時的訊息接收成功率。可以發現，無論在 20 公尺或 45 公尺高度，以及 750Bytes 或 1250Bytes 的訊息總長度下，若採用萬華區參數組，其成功率皆低於大安區本身最佳參數組（見表 4.7），例如：以 20 公尺高、750Bytes 為例，使用萬華區同條件下最佳參數組的接收成功率為 86.8%，較大安區最佳參數組的 88.05% 低，其餘條件亦有類似情形，降幅介於 0.05% 至 1.25%。可以發現最佳參數組具有一定的區域專屬性，但跨區使用時仍具備一定的容錯空間。

表 4.10 大安區最佳參數於同環境之萬華區訊息接收成功率對照表

萬華區飛行環境	大安區同環境之最佳參數組	成功率
萬華區 20m (M=750Bytes)	$k_1 = 47$ 、 $\lambda_I = 8$ 、 $k_2 = 23$	94.3%
萬華區 20m (M=1250Bytes)	$k_1 = 77$ 、 $\lambda_I = 16$ 、 $k_2 = 23$	94.3%
萬華區 45m (M=750Bytes)	$k_1 = 73$ 、 $\lambda_I = 2$ 、 $k_2 = 15$	99.3%
萬華區 45m (M=1250Bytes)	$k_1 = 99$ 、 $\lambda_I = 4$ 、 $k_2 = 23$	99.3%

表 4.10 比較了萬華區在不同高度與訊息長度下，採用大安區最佳參數組時的訊息接收成功率。結果顯示，萬華區在 20 公尺或 45 公尺高度，以及 750Bytes 或 1250Bytes 的訊息總長度下，若改用大安區最佳參數組，接收成功率僅較原萬華區最佳參數組低 0.05–0.2%（見表 4.7），整體結果略差於原地區之最佳參數組，然而差距不超過 0.2%。

結果顯示萬華區對參數組的容忍度較高，套用大安區參數組幾乎不影響實務效能。推論原因為大安區之建築阻擋率較萬華區高出一倍（見表 4.5），因此能在較嚴苛的大安環境達標的參數組，套用到遮蔽較少的萬華自然仍可維持高效能。

#### 4.3.4 結果分析

本研究使用雙擦除碼進行串聯，在此架構下，內碼主要負責於修正隨機錯誤並將無法糾正的錯誤以擦除的形式標記，而外碼則利用其較大的冗餘來修復這些已知位置的擦除符號。因此，為提升整體可靠度，內碼需具備足以壓低殘餘錯誤率的糾錯能力，以盡可能的還原隨機錯誤，而外碼則需配置足夠的冗餘，以最大化能夠承受的訊息丟失位元數。同時，透過交錯器將叢發性錯誤打散，能進一步外碼的容錯負荷量。

由於飛行距離與訊息總長度的限制，並不能無節制的添加過多的冗餘。因此在遮蔽率較高的地區，應該選擇較大的  $k_2$  與較小的  $k_1$ ，即意味著將更多的冗餘留給外碼，以最大化外碼能處理的訊息丟失位元數。

對於交錯碼深度的選擇，並不是越大越好，應考慮整體訊息長度與區域等綜合因素。以現有的模擬數據，於大部分地區選用最大為 8 或 16 之深度即可獲得良好的還原效果；而對於遮蔽率較低之地區，選擇 2 或 4 作為交錯碼之深度，可達到更高的訊息還原率。

綜合比較表 4.5 - 4.8，可以明顯看出：無人機在遮蔽物較密集的地區飛行時，若未進行編碼處理，其訊息接收成功率會非常糟糕；而透過本研究所提出之編碼機制，可以顯著提升無人機於充滿障礙物環境下，傳輸長訊息的訊息接收成功率。

綜合分析表 4.9、4.10，可見最佳參數組具「區域優化」特性，但各區建物分

布差異有限，故跨區使用僅造成 0.05%至 1.25%的損失，仍保有實務容錯空間。換言之，若無法即時重算本地最佳值，採用鄰區參數亦可達近似效果。



## Chapter 5 結論與未來展望

### 5.1 結論



本篇論文透過將 Interleaved Code 與兩層的 Reed-Solomon Code 組合而成的串聯碼架構，運用於藍牙廣播，有效的解決了廣播訊息遭受物理阻擋後的還原問題。

而為了讓此廣播訊息編碼系統能夠有效地被應用，本研究也著手透過與台灣大學的高能遙測與城市資訊科學研究中心合作，取得真實的台北市建築物進行分析，透過 QGIS 等開源 GIS 分析工具，模擬無人機在都會區實際飛行時，可能遭遇的障礙物（建築物）分佈情形。

本研究基於取得的地圖資訊所產生的無人機飛行航線資料，在針對在一段固定飛行長度( L )的無人機航線中，給定無人機的飛行速度( V )，固定的訊息傳輸間隔時間( I )，選用通訊協議之廣播封包的有效訊息量( Ps )與不同長度的廣播訊息( m )，透過本研究所提出的模擬方法，可得到針對不同飛行環境下，最適當的外碼( Reed-Solomon Code ) 參數(  $n_1, k_1$  )交錯碼的參數(  $\lambda$  )與內碼( Reed-Solomon Code )參數(  $n_2, k_2$  )。

透過本研究所提供的方法，即可針對已有真實世界地圖資料的地區，得出最適當的編碼參數組，進而有效解決無人機於高空廣播時遭遇障礙物而產生之訊號阻隔問題。

### 5.2 未來展望

本研究證實使用「雙層里德·所羅門碼結合交錯器」可以有效解決無人機於高

空廣播時遭遇障礙物而產生之訊號阻隔問題，然而此方法需要先擁有該地區的地圖資料，才能進行分析與編碼參數的模擬，但對於未知地圖的區域則無法透過此方法得到最適當的編碼參數。後續可依據以下方向進行延伸：



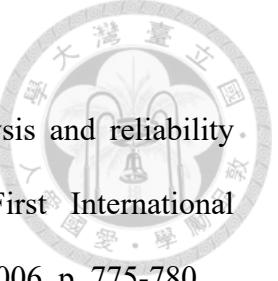
1. 無圖資區域的理論建模：建立遮蔽率與建物統計量的理論模型，推導模型與最佳參數組之間的對應關係，或以機器學習等方式，構建「環境特徵」到「編碼參數」的映射關係，使未知區域也能快速推估最佳參數的近似解。
2. 多元錯誤更正機制：評估如：低密度奇偶校驗碼( Low-Density Parity-Check Code, LDPC )、猛禽碼 ( Raptor Code ) 與極化碼 ( Polar Code ) 等新型通道邊碼，及其與交錯器、串聯碼的組合，比較在相同冗餘的條件下，是否可以更進一步提升成功率。
3. 更複雜的交錯機制：本研究採用傳統的區塊交錯器(Block Interleaver)進行模擬測試，後續可評估如：隨機交錯器(Random Interleaver)、卷積交錯器 ( Convolutional Interleaver )、代數交錯器( Algebraic Interleaver)等進階交錯編碼機制，觀察其與不同錯誤更正碼之間的組合，比較是否可以更進一步提升成功率或編碼效率。
4. 跨城市與異質環境驗證：可將框架延伸至高樓更密集的大型都會區、低樓層郊區、高海拔森林地區等多元場景，探討「遮蔽率」到「最佳編碼參數」的可遷移性，並建立針對不同地區的參數地圖。
5. 動態/自適應編碼：結合即時的封包丟失率，或是在面對跨區飛行時，能夠在飛行中動態調整碼率與交錯碼深度，兼顧高遮蔽率地區的傳輸可靠度與低遮蔽地區的傳輸效率。

## References



- [1] K. Belwafi, R. Alkadi, S. A. Alameri, H. A. Hamadi and A. Shoufan, "Unmanned Aerial Vehicles' Remote Identification: A Tutorial and Survey," in IEEE Access, vol. 10, pp. 87577-87601, 2022.
- [2] C. F. E. de Melo et al., "UAVouch: A Secure Identity and Location Validation Scheme for UAV-Networks," in IEEE Access, vol. 9, pp. 82930-82946, 2021.
- [3] K. N. Qureshi, S. Din, G. Jeon and F. Piccialli, "Internet of Vehicles: Key Technologies, Network Model, Solutions and Challenges With Future Aspects," in IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 22, no. 3, pp. 1777-1786, March 2021.
- [4] K. N. Qureshi et al., "Authentication scheme for unmanned aerial vehicles based internet of vehicles networks," Egyptian Informatics Journal, vol. 23, no. 1, pp. 83-93, 2022.
- [5] E. Zanaj et al., "Energy efficiency in short and wide-area IoT technologies—A survey," Technologies, vol. 9, no. 1, p. 22, 2021.
- [6] Bluetooth Core Specification Version 5.0, Bluetooth SIG, Dec. 2016.
- [7] Bluetooth Core Specification Version 5.1, Bluetooth SIG, Jan. 2019.
- [8] Bluetooth Core Specification Version 5.2, Bluetooth SIG, Dec. 2019.
- [9] Bluetooth Core Specification Version 5.3, Bluetooth SIG, Jul. 2021.
- [10] Bluetooth Core Specification Version 5.4, Bluetooth SIG, Jan. 2023.
- [11] Bluetooth Core Specification Version 4.0, Bluetooth SIG, Jun. 2010. [Vol 2] pp. 139-149.
- [12] Krassi, Boris A. "Reliability of bluetooth." Proceedings of the 12th Conference on

Extreme Robotics, RTC, St. Petersburg. 2001.

- 
- [13] LIANG, Junxue; LI, Yingchuan; YU, Bin. Performance analysis and reliability improvement of bluetooth broadcast scheme. In: 2006 First International Symposium on Pervasive Computing and Applications. IEEE, 2006. p. 775-780.
  - [14] EL-BENDARY, MAM Mohamed, et al. Bluetooth performance improvement over different channels through channel coding. In: 2008 5th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices. IEEE, 2008. p. 1-5.
  - [15] Spörk, Michael, Jiska Classen, Carlo Alberto Boano, Matthias Hollick, and Kay Römer. "Improving the Reliability of Bluetooth Low Energy Connections." In EWSN, pp. 144-155. 2020.
  - [16] Zachariah, Thomas, Neal Jackson, Branden Ghena, and Prabal Dutta. "ReliaBLE: Towards Reliable Communication via Bluetooth Low Energy Advertisement Networks." In EWSN, pp. 96-107. 2022.
  - [17] Unmanned Aircraft System (UAS) Traffic Management (UTM) – Concept of Operations v2.0, Department of Transportation Federal Aviation Administration, USA, 2020.
  - [18] Rios, Joseph L., et al. UAS Service Supplier Specification. No. NASA/TM-2019-220376. 2019.
  - [19] Unmanned Aircraft Systems (UAS) Traffic Management (UTM) Implementation Plan, Department of Transportation Federal Aviation Authority, USA, 2023.
  - [20] Remote Identification of Unmanned Aircraft — Final Rule, Department of Transportation Federal Aviation Administration, USA, 2021.
  - [21] Standard Specification for Remote ID and Tracking, ASTM Standard ASTM F3411-22, 2022.
  - [22] P. Tedeschi, S. Sciancalepore, and R. Di Pietro, "ARID: Anonymous remote

identification of unmanned aerial vehicles," in Proc. 37th Annual Computer Security Applications Conference, 2021.

- 
- [23] E. Wisse, P. Tedeschi, S. Sciancalepore and R. Di Pietro, "A2RID—Anonymous Direct Authentication and Remote Identification of Commercial Drones," in IEEE Internet of Things Journal, vol. 10, no. 12, pp. 10587-10604, 15 June 15, 2023.
  - [24] Camenisch, Jan, and Anna Lysyanskaya. "An efficient system for non-transferable anonymous credentials with optional anonymity revocation." Advances in Cryptology—EUROCRYPT 2001: International Conference on the Theory and Application of Cryptographic Techniques Innsbruck, Austria, May 6–10, 2001 Proceedings 20. Springer Berlin Heidelberg, 2001.
  - [25] Derler, David, and Daniel Slamanig. "Highly-efficient fully-anonymous dynamic group signatures." Proceedings of the 2018 on Asia Conference on Computer and Communications Security. 2018.
  - [26] R. Alkadi and A. Shoufan, "Unmanned Aerial Vehicles Traffic Management Solution Using Crowd-Sensing and Blockchain," in IEEE Transactions on Network and Service Management, vol. 20, no. 1, pp. 201-215, March 2023.
  - [27] Y. Hashem, E. Zildzic, and A. Gurto, "Secure drone identification with hyperledger Iroha," in Proc. 11th ACM Symposium on Design and Analysis of Intelligent Vehicular Networks and Applications, 2021.
  - [28] O. Mujumdar, H. Celebi, I. Guvenc, M. Sichitiu, S. Hwang and K. -M. Kang, "Use of LoRa for UAV Remote ID with Multi-User Interference and Different Spreading Factors," 2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring), Helsinki, Finland, 2021, pp. 1-7.
  - [29] C. E. Shannon, "A mathematical theory of communication," in The Bell System Technical Journal, vol. 27, no. 3, pp. 379-423, July 1948.

- [30] Lin, Shu, and Daniel J. Costello. "Error control coding second edition." Upper Saddle River, 2004.
- [31] Neubauer, Andre, Jurgen Freudenberger, and Volker Kuhn. Coding theory: algorithms, architectures and applications. John Wiley & Sons, 2007. p. 93.
- [32] Reed, Irving S., and Gustave Solomon. "Polynomial codes over certain finite fields." Journal of the society for industrial and applied mathematics 8.2 (1960): 300-304.
- [33] T. Filiba, "reedsolo (Version 1.7.0) [Software]." Jan. 18 2023. [Online]. Available: <https://pypi.org/project/reedsolo/>
- [34] Morelos-Zaragoza, Robert H. The art of error correcting coding. John Wiley & Sons, 2006. p.133-134.
- [35] G. Caire, G. Taricco, and E. Biglieri, "Bit-interleaved coded modulation," IEEE Transactions on Information Theory, vol. 44, no. 3, pp. 927-946, May 1998.
- [36] Y. Q. Shi, Xi Min Zhang, Zhi-Cheng Ni and N. Ansari, "Interleaving for combating bursts of errors," in IEEE Circuits and Systems Magazine, vol. 4, no. 1, pp. 29-42, 2004.
- [37] Forney, G. David. "Concatenated codes." (1965).
- [38] X. Liu, H. Jia, and C. Ma, "Error-correction codes for optical disk storage," in Advances in Optical Data Storage Technology, vol. 5643, SPIE, 2005.
- [39] K. A. S. Immink, "The digital versatile disc (DVD): System requirements and channel coding," SMPTE J., vol. 105, no. 8, pp. 483-489, Aug. 1996.
- [40] S. A. Butman, L. J. Deutsch, and R. L. Miller, "Performance of concatenated codes for deep space missions," The Telecommunication and Data Acquisition Report, vol. 42-64, pp. 33–39, May-June 1981.
- [41] J. Taylor, "The Deep Space Network: A Functional Description," [Online].

Available:

[https://descanso.jpl.nasa.gov/monograph/series13/DeepCommo\\_Chapter2--141029.pdf](https://descanso.jpl.nasa.gov/monograph/series13/DeepCommo_Chapter2--141029.pdf)

[42] 鄉鎮市區界線(TWD97 經緯度) - 政府資料開放平臺, July 2023,

<https://data.gov.tw/dataset/7441>.

[43] GROSS, Donald, et al. Fundamentals of Queueing Theory. 2008. pp.259-270.

[44] Bluetooth Core Specification Version 4.0, Bluetooth SIG, Jun. 2010. [Vol 6] pp. 36-42.