



國立臺北科技大學

資訊工程系碩士班

碩士學位論文

改善 FruityMesh 藍牙低功耗網狀網路傳輸

效能的設計與實作

Design and Implementation of Performance

Enhancements in FruityMesh Based Bluetooth Low

Energy Mesh Networks

研究生：陳柏勳

指導教授：吳和庭博士

中華民國一百一十四年七月



國立臺北科技大學

資訊工程系碩士班

碩士學位論文

改善 FruityMesh 藍牙低功耗網狀網路傳輸

效能的設計與實作

Design and Implementation of Performance

Enhancements in FruityMesh Based Bluetooth Low

Energy Mesh Networks

研究生：陳柏勳

指導教授：吳和庭博士

中華民國一百一十四年七月

「學位論文口試委員會審定書」掃描檔

審定書填寫方式以系所規定為準，但檢附在電子論文內的掃描檔須具備以下條件：

1. 含指導教授、口試委員及系所主管的完整簽名。
2. 口試委員人數正確，碩士口試委員至少 3 人、博士口試委員至少 5 人。
3. 若此頁有論文題目，題目應和書背、封面、書名頁、摘要頁的題目相符。
4. 此頁有無浮水印皆可。

摘要

關鍵詞：藍牙低功耗、物聯網、FruityMesh、BLE Mesh、網路拓撲、傳輸壅塞、重傳率、封包傳遞成功率

藍牙低功耗 (Bluetooth Low Energy, BLE) 有省電及低成本的特性，使得藍牙技術在物聯網 (Internet of Things, IoT) 中占據重要的角色。在物聯網的應用中，大量使用無線感測網路 (Wireless Sensor Networks, WSN)，會在環境中分布建立許多的節點，而節點不只有當作感知器測量環境的數據，常常還要當作中繼節點，負責轉傳發送端與目的端之間的封包。最終，將所有量測的數據匯集到 Sink 節點，以監控所有的節點數據，將數據儲存後，進行分析後並做出適當的處理，也可以透過分析數據預測環境的變化，並提前做出適當的處理。本論文針對 FruityMesh 網路建立流程進行改善，讓 Sink 節點在網路建立完成後成為整個網狀網路的根節點，並且確保 Sink 節點斷線後重新連線時，仍然是根節點的角色。如此一來，所有非 Sink 節點在傳送封包至 Sink 節點時，只需要往父親節點傳輸封包即可，有效的減少節點發送及轉發的次數。此外，本論文也透過調整 BLE 相關參數，緩解大量封包匯聚至根節點所造成傳輸壅塞的問題，進一步提升了整體 Mesh 網路的封包傳遞成功率 (Packet Delivery Ratio, PDR)、降低了封包傳輸延遲及重傳率，進而改善網路效能。

Abstract

Keyword: Bluetooth Low Energy, Internet of Things, FruityMesh, BLE Mesh, Network Topology, Transmission Congestion, Retransmission Rate, Packet Delivery Ratio

Bluetooth Low Energy (BLE) is characterized by its low power consumption and cost-effectiveness, making it a key technology in the development of the Internet of Things (IoT). In IoT applications, Wireless Sensor Networks (WSNs) are widely used, where numerous sensor nodes are distributed throughout the environment. These nodes not only collect environmental data but often function as relay nodes, responsible for forwarding packets between the source and destination. Ultimately, all collected data is aggregated at the Sink node, which serves as a central point for monitoring, storage, and analysis. This enables the system to make informed decisions and even predict environmental changes based on the analyzed data. This thesis proposes an enhancement to the FruityMesh network formation process, ensuring that the Sink node becomes the root node of the mesh network once the network is established. Furthermore, it guarantees that the Sink node retains its root node role even after disconnection and reconnection. With this configuration, non-Sink nodes can transmit packets toward the Sink node by simply forwarding them to their parent node, effectively reducing the number of transmissions and retransmissions required. Additionally, by tuning specific BLE parameters, the proposed method alleviates network congestion caused by high packet traffic toward the root node. The experimental results show that the proposed improvements increase the Packet Delivery Ratio (PDR), reduce transmission delay and retransmission rates, and ultimately enhance overall network performance.

致謝

所有對於研究提供協助之人或機構，作者都可在誌謝中表達感謝之意。

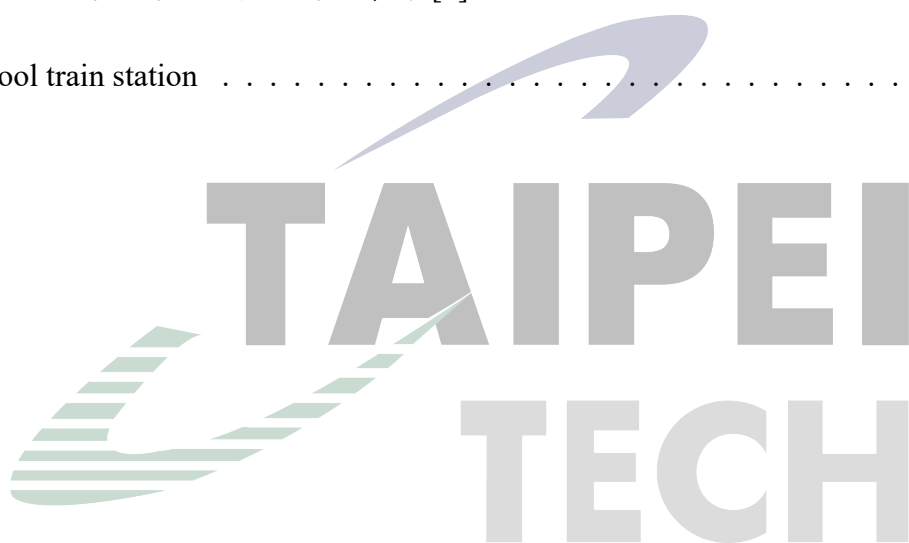


目錄

摘要	i
Abstract	ii
致謝	iii
目錄	iv
第一章 緒論	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究動機與目的	2
1.3 論文架構	3
第二章 相關技術與背景	4
2.1 藍牙低功耗技術 (Bluetooth Low Energy, BLE)	4
2.1.1 廣播模式 (Advertising Mode)	5
2.1.2 連接模式 (Connection-Oriented Mode)	6
2.1.3 BLE 排程機制	6
第三章 若標題太長，則可以分成兩行排列的形式撰寫	8
3.1 名詞定義 (小標)	8
3.2 模型說明 (小標)	8
參考文獻	9

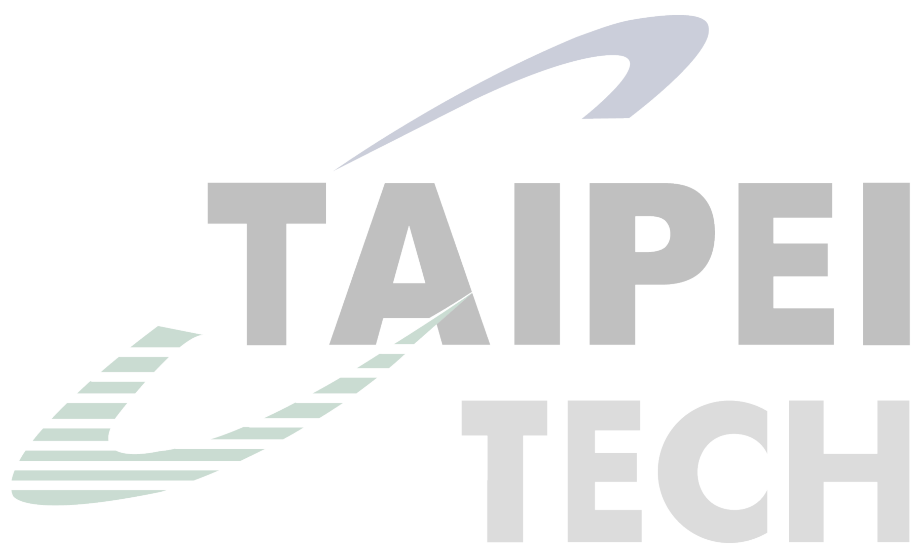
圖目錄

1.1	IoT 市場規模評估 [1]	1
2.1	廣播頻道與資料頻道示意圖 [5]	4
2.2	Controller layer 狀態機示意圖 [5]	5
2.3	廣播模式示意圖 [6]	5
2.4	連線模式示意圖 [6]	6
2.5	Master 連接建立過程和連接事件 [7]	7
3.1	Cool train station	8



表目錄

3.1 表格範例標題	8
------------------	---



第一章 緒論

1.1 研究背景

科技的快速進步，讓人們的生活更加便利，物聯網（IoT）的應用已經與日常生活密不可分，包含了醫療及工業的應用，無所不在，[1] 根據日商環球訊息有限公司（GII）調查，物聯網（IoT）市場規模預計從 2024 年到 2029 年，將從 1.17 兆美元增加至 2.37 兆美元，年均複合成長率（CAGR）為 15.12%，如（圖 1.1）所示。



圖 1.1 IoT 市場規模評估 [1]

2010 年 6 月藍芽技術聯盟（Bluetooth Special Interest Group）提出了低功耗藍芽（Bluetooth Low Energy, BLE），BLE 省電及低成本的特性，使得藍芽技術在物聯網（IoT）的應用種佔據了不可或缺的角色，例如：目前市面上的無線設備包括藍芽耳機、藍芽鍵盤及藍芽滑鼠。物聯網（IoT）的應用中，大量使用無線感測網路（Wireless Sensor Networks, WSN），會在環境之中分布許多的節點，而節點不只有當作感知器測量環境的數據，常常還要當作中繼節點，轉傳發送端與目的端的封包，最終將所有量測的數據匯集到終端節點，以監控所有的節點數據，將數據儲存後，進行分析後並做出適當的處理，也可以透過分析數據預測環境的變化，並提前做出適當的處理。

物聯網 (IoT) 的應用中，大量使用無線感測網路 (Wireless Sensor Networks, WSN)，會在環境之中分布許多的節點，而節點不只有當作感知器測量環境的數據，常常還要當作中繼節點，轉傳發送端與目的端的封包，最終將所有量測的數據匯集到終端節點，以監控所有的節點數據，將數據儲存後，進行分析後並做出適當的處理，也可以透過分析數據預測環境的變化，並提前做出適當的處理。

藍芽網狀網路 (Bluetooth Mesh) 架構的實現，讓 BLE 更具有可靠性 (Reliability) 及擴展性 (Scalability)，可以允許多個 BLE 相互連接並形成網狀結構，讓封包可以在多個裝置或節點之間進行傳輸，讓傳輸距離不會受到單一裝置的傳輸範圍限制，解決了節點之間裝置連接數量的限制以及傳輸距離不足的問題，在物聯網 (IoT) 的應用，例如：智慧建築、智慧工業、智慧城市、智慧家庭.. 等等，BLE 都已經扮演重要也不可或缺的角色。

在物聯網 (IoT) 與藍芽網狀網路 (Bluetooth Mesh) 中，對整個系統架構做出適當的評估，在不影響裝置效能的情況下，設計多個藍芽裝置之間的分流機制，因為在整個系統中，流量可能會有所起伏，為了讓每個裝置可以有一樣的傳輸品質，且系統可以發揮最好的吞吐量。

1.2 研究動機與目的

根據文獻 [2] 中針對 Multi-Hop 的提出 DOT 及 DOST 排程設計，研究發現在原生 FruityMesh 上封包傳輸是採用廣播的方式，向相鄰的所有節點發送封包，這種設計雖然簡單，卻容易導致大量冗餘封包的產生，這會導致節點之間傳輸不必要的封包，最終導致整個 BLE Mesh 出現廣播風暴。

[2] 作者針對 FruityMesh 傳輸時產生的廣播風暴，提出了 DOT (Destination Oriented Transmission) 排程的機制，將 BLE Mesh 導入樹狀結構，對整個系統進行分層管理，讓封包傳輸只會向正確的路徑上傳輸，避免了廣播風暴的產生，但是作者在研究過程中，也發現 BLE Multi-Hop 網狀網路節點會擁有 Master 以及 Slave 兩種角色，而在同一個時間下，節點同時會是 Master 和 Slave 的狀態，而這種狀態上的衝突會導致的封包傳輸產生遺失現象。

[2] 作者為了解決角色衝突的問題，在 DOT 的架構下增加啟用以及禁用的機制，

提出 DOST (Destination Oriented Switch Transmission) 的排程設計，利用 TDMA 讓裝置在同一個時間只會扮演 Master 或 Slave，解決在同一個時間點節點可能會因為扮演 Master/Slave 角色衝突而導致的封包傳輸遺失的問題；在研究 [2] 中作者在 FruityMesh 中導入 DOST 設計，改善了大部分的封包傳輸延遲以及封包重傳率，但仍存在些許效能瓶頸，因為在 FruityMesh 中，所有節點的封包傳輸都是透過廣播的方式進行，這會導致在多個節點同時傳輸封包時，可能會產生封包碰撞的問題，導致封包傳輸延遲增加。

此外，文獻指出，若要在 DOST 架構下進一步提升效能，需確保拓樸建立時，Sink 節點為整體網路的根節點。然而原研究並未針對拓樸控制機制提出具體解法。若未能確保 Sink 位於樹根，當其斷線並重新加入網路時，可能無法恢復為原先的根節點角色，進而影響整體傳輸路徑的穩定性與效能。

在 [2][3] 中，針對了 single hop mesh 及 multi hop mesh 的網路拓樸進行探討，當使用合適的封包連接參數可以有效降低封包傳輸延遲及重傳率，但是數據實際上傳輸時，每個封包大小並不固定，[4] 中，探討了不同封包大小可以算出最適合的連接參數，在傳輸過程動態調整連接的 CE(Connection Event) 及 CI(Connection Interval)，達到更好的吞吐量。

本計畫將研究中在 DOT 的排程設計下，仍然會有些許因為封包遺失，而產生的封包重傳的問題，以及在藍牙網狀網路 (Bluetooth Mesh) 架構，執行 TDMA 的排程機制，結合調整連線數據，透過修改 Connection Interval 數值，確保傳輸品質及確保系統可以產生最大吞吐量，並修改 FruityMesh 拓樸方法，讓 BLE Mesh 建立的過程確保 Sink 點在整個樹狀結構的根節點，也確保 Sink 點如果斷線後重新連線後依然是整個 BLE Mesh 樹狀結構的根節點。

1.3 論文架構

第二章 相關技術與背景

2.1 藍牙低功耗技術 (Bluetooth Low Energy, BLE)

藍牙技術聯盟 (Bluetooth Special Interest Group) 在 2010 年 6 月發布了可以短距離數據交換和低功耗的藍牙低功耗技術 (Bluetooth Low Energy, BLE)。而藍牙低功耗技術被發布後，就被物聯網 (IoT) 廣泛的應用，包括了家庭娛樂、醫療保健、運動健身、安防以及信標等領域。

藍牙低功耗技術 (Bluetooth Low Energy, BLE) 是一種功耗極低的技術，這一個技術讓裝置在大部分的時間都在休眠模式，只有在需要使用該裝置時，才會快速喚醒進行工作，這讓 BLE 裝置僅需要一顆鈕扣電池就可以運作數月甚至數年之久，這讓 BLE 生產成本更低，且保留了傳統藍牙 (Classic Bluetooth) 類似的通訊範圍，且一樣相容於手機、平板電腦等設備。

BLE 運作在 2.4G 的 ISM 頻段，利用 FDMA，將 2402MHz 2480MHz 分成 40 個 Channel，又將這些 Channel 又分成兩種傳輸模式，廣播模式 (Advertising Mode) 及連線模式 (Connection-Oriented Mode)，其中廣播模式使用了 Channel 37、Channel 38、Channel 39，工作頻率分別是 2403MHz、2426MHz、2480MHz，剩餘的 37 個 Channel 為連線模式使用，如圖 (2.1) 所示。

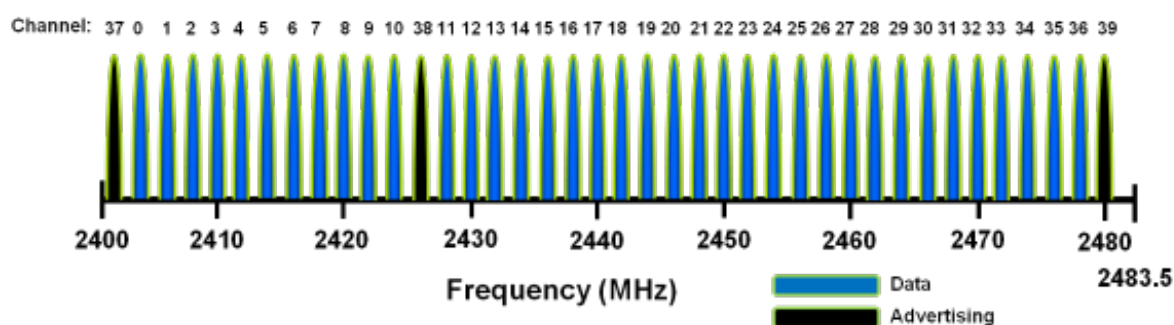


圖 2.1 廣播頻道與資料頻道示意圖 [5]

廣播模式和連線模式的運作機制由 BLE 的控制層 (Controller Layer) 狀態機管理，包括 Standby (等待)、Advertising (廣播)、Scanning (掃描)、Initiating (初始化)、Connection (連接) 五種狀態，如圖 (2.2) 所示。

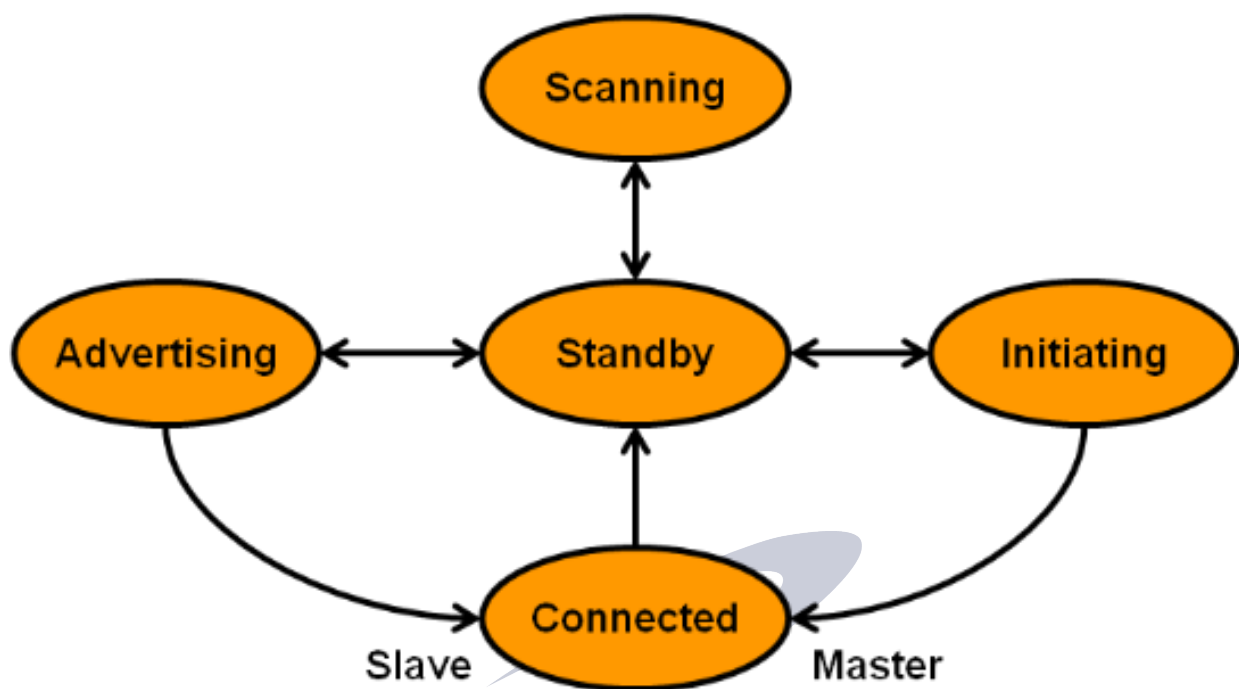


圖 2.2 Controller layer 狀態機示意圖 [5]

2.1.1 廣播模式 (Advertising Mode)

在廣播模式中，會使用 Channel 37、Channel 38、channel 39 這三個廣播頻道，主要用於掃描裝置、建立通訊頻道和廣播的傳輸，其中廣播者 (Advertiser) 是由待機狀態 (Standby Status) 進入廣播狀態 (Advertising Status)，廣播者會在三個廣播頻道輪流發送廣播封包，讓掃描者 (Scanner) 可以檢測到其存在，並提供基本的數據，例如：裝置名稱或狀態。掃描者 (Scanner) 是由待機狀態 (Standby Status) 進入掃描狀態 (Scanner Status)，掃描者會輪流掃描三個廣播頻道的廣播封包，已接收範圍內的所有廣播的資訊，掃描收集數據後，準備與廣播設備建立連接，如圖 (2.3) 所示。

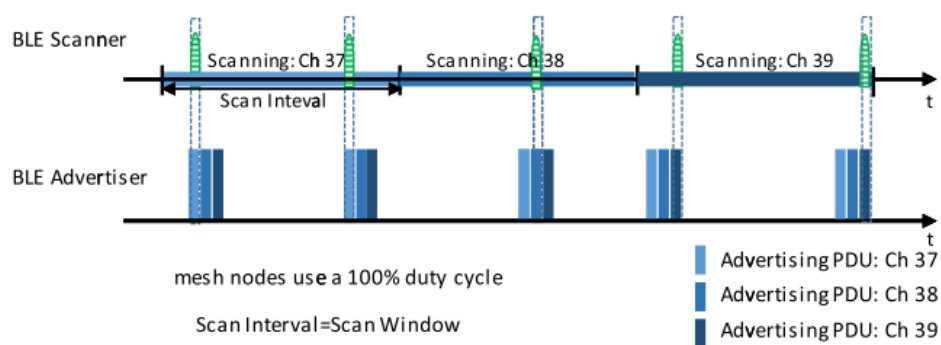


圖 2.3 廣播模式示意圖 [6]

2.1.2 連接模式 (Connection-Oriented Mode)

連接模式中，設備需要首先透過廣播模式建立連接，其中廣播者 (Slave) 負責發送連線請求的廣播封包，而掃描者 (Master) 檢測到廣播封包後，從 Standby 進入 Scanning，再進入 Initiating 狀態，開始與廣播設備握手 (Handshake)。當握手成功後，雙方進入 Connection 狀態。連接建立後，Master 與 Slave 可通過剩餘的 37 個數據頻道進行數據傳輸；Master 負責與多個 Slave 的連線管理，分配專屬的時間槽 (Time Slot) 給各連接設備，即使沒有數據需要傳輸，系統仍會保留固定的時間槽以確保系統的穩定性，避免通訊衝突。(圖 2.4) 為連線模式示意圖

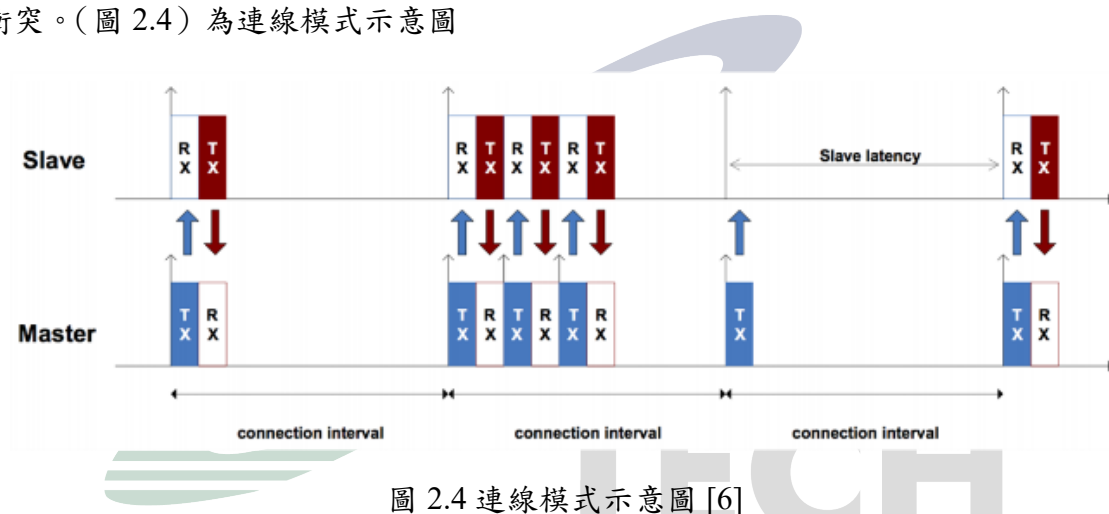


圖 2.4 連線模式示意圖 [6]

2.1.3 BLE 排程機制

廣播者 (Advertiser) 和掃描者 (Scanner) 會在建立連線後，進行數據的交換，當掃描者在三個掃描頻道掃描並偵測到廣播者發送的封包後，掃描者會在約 150 微秒 (T_{IFS}) 後回應一個 CONNECT_IND 封包。CONNECT_IND 封包包含了多項管理連接的參數，例如：影響錨點時間 (Anchor Point, AP) 的 WinSize 以及 WinOffset。建立連線之後，Connection Interval (CI)、Anchor Point (AP) 和 Connection Event (CE) 對於裝置之間的排程機制影響非常的大，在一個 Connection Interval (CI) 的時間內，一個 Slave 裝置只會與 Master 裝置有一個 Connection Event (CE) 傳輸時間來進行資料的交換，所以 Connection Interval (CI) 的時間影響 Connection Event (CE) 的發生頻率，這直接影響到整個系統的效能及吞吐量，圖 (2.5) 表示了 Master 連接建立過程和連接事件。

CONNECT_IND 封包會在 t_{ind} 時間內完成傳輸，Master 會在公式 (a) 至公式 (b) 的時

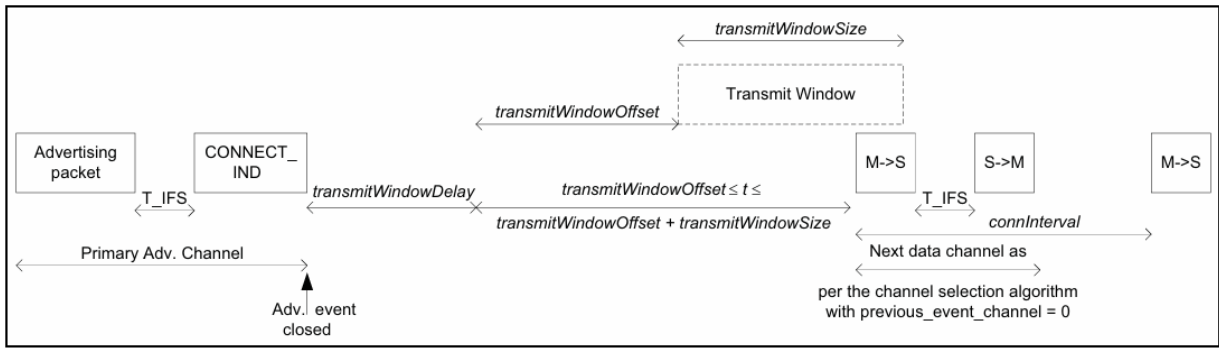


圖 2.5 Master 連接建立過程和連接事件 [7]

間內設置第一個錨點（Anchor Point, AP），其中 $\text{transmitWindowDelay}$ 通常為 1.25 ms，用來同步 Master 與 Slave。 transmitWinOffset 與 transmitWinSize 分別由公式（c）與（d）算出。 WinOffset 代表錨點（Anchor Point, AP）的偏移量； WinSize 代表錨點（Anchor Point, AP）可能發生的時間範圍 [8]。

$$t_{\text{ind}} + \text{transmitWindowDelay} + \text{transmitWinOffset} \quad (\text{a})$$

$$t_{\text{ind}} + \text{transmitWindowDelay} + \text{transmitWinOffset} + \text{transmitWinSize} \quad (\text{b})$$

$$\text{transmitWinOffset} = \text{WinOffset} \times 1.25 \text{ ms} \quad (\text{c})$$

$$\text{transmitWinSize} = \text{WinSize} \times 1.25 \text{ ms} \quad (\text{d})$$

第三章 若標題太長，則可以分成兩行排列的形式 撰寫

3.1 名詞定義（小標）

定義定義定義定義定義定義 [2]，定義定義定義定義，定義定義定義定義定義定義定義定義定義定義，定義定義。

表 3.1 表格範例標題

Protocol	P	CS_1	CS_2	RG
MSSMul	$O(1), O(1), N/A$	$O(n-t), O(n), O(1)$	$O(n-t), O(n), N/A$	$O(1), O(n), O(n)$
SC	$O(1), O(1), N/A$	$O(n-t), O(n), O(1)$	$O(n-t), O(n), N/A$	$O(1), O(n), O(n)$

3.2 模型說明（小標）

說明說明說明說明，說明說明說明說明說明說明說明說明說明說明說明說明說明說明，說明說明說明說明說明說明說明說明說明。

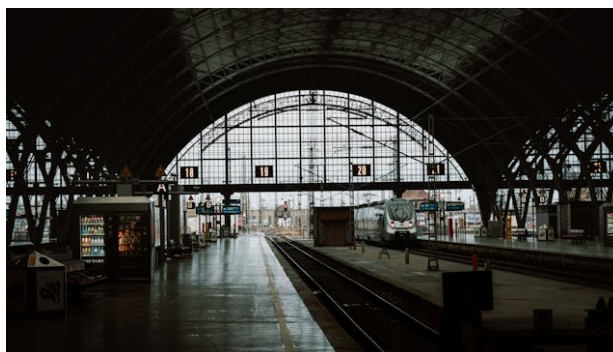


圖 3.1 Cool train station

參考文獻

- [1] Mordor Intelligence. *Internet of Things (IoT) - Market Share Analysis, Industry Trends & Statistics, Growth Forecasts 2024–2029*. Accessed: 2025-06-04. Jan. 2024. URL: <https://www.gii.tw/report/moi1403099-internet-things-iot-market-share-analysis-industry.html>.
- [2] 溫淇淼. “基於 FruityMesh 之藍牙低功耗網狀網路傳輸機制的設計以改善 QoS”. PhD thesis. 台北市, 2024, p. 41. URL: <https://hdl.handle.net/11296/7u74xv>.
- [3] 吳俊諺. “基於 FruityMesh 之 BLE TDMA 傳輸機制的設計與實現”. PhD thesis. 台北市, 2022, p. 48. URL: <https://hdl.handle.net/11296/a3g254>.
- [4] 郭家瑋. “基於 Nordic SoftDevice 之 BLE TDMA 傳輸機制的設計與實現”. PhD thesis. 台北市, 2021, p. 55. URL: <https://hdl.handle.net/11296/5c352v>.
- [5] MICROCHIP Developer Help. *Bluetooth Link Layer*. <https://microchipdeveloper.com/xwiki/bin/view/applications/ble/introduction/bluetootharchitecture/bluetooth-controller-layer/bluetooth-link-layer>. Accessed: Nov. 2023. Nov. 2023.
- [6] ángela Hernández-Solana et al. “Bluetooth Mesh Analysis, Issues, and Challenges”. In: *IEEE Access* 8 (2020), pp. 53784–53800. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2980795.
- [7] Bluetooth SIG. *Bluetooth Core Specification Version 5.0*. <https://www.bluetooth.com/specifications/specs/core-specification-5-0/>. Accessed: 2025-06-04. 2016.
- [8] Eunjeong Park, Hyung-Sin Kim, and Saewoong Bahk. “BLEX: Flexible Multi-Connection Scheduling for Bluetooth Low Energy”. In: *Proceedings of the 20th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (Co-Located with CPS-IoT Week 2021)*. IPSN '21. Nashville, TN, USA: Association for Computing Machinery, 2021, pp. 268–282. ISBN: 9781450380980. DOI: 10.1145/3412382.3458271. URL: <https://doi.org/10.1145/3412382.3458271>.