

# 於 LoRa 工業物聯網中以感知無線為基礎之媒介存取控制 協定設計

## A Cognitive Radio-based MAC Protocol for LoRa in Industrial IoT

吳建民 南華大學資訊工程系教授

### 摘 要

在感知無線環境下，以LoRa為基礎設計滿足多重通道單一跳躍工業物聯網中即時和非即時資料傳輸之改良分散式佇列MAC協定。在此，改良分散式佇列機制將以節點剩餘能量多寡決定競爭時槽取代分散式佇列的隨機挑選機制，以降低節點能量消耗及資料傳遞延遲。而多重通道將可解決終端節點流量壅塞所衍生碰撞的問題，感知無線也可解決LoRaWAN最大工作週期調變的限制。因此本論文將於LoRa工業物聯網中以感知無線為基礎，設計改良分散式佇列媒介存取控制協定以滿足資料傳遞延遲QoS及頻譜共享最大化。

**關鍵詞：**LoRa、分散式佇列、工業物聯網、感知無線

Chien-Min Wu, Professor, Depart. of Computer Science and Information  
Engineering, Nanhua University

### **Abstract**

The multichannel single-hop cognitive radio-based MAC protocol with periodic real-time and aperiodic nonreal-time traffic is proposed for LoRa in Industrial IoT. The contention slot of distributed queuing (DQ) MAC protocol is selected randomly. However, the contention slot of modified distributed queuing MAC protocol is determined by the residual energy of node. And this scheme will reduce the energy consumption and propagation delay. For the multichannel of cognitive radio will solve the collision problems under heavy traffic load. And cognitive radio will also solve the maximum duty-cycle regulation limits. In the first year, the modified distributed queuing MAC protocol will be proposed to satisfy QoS requirements of propagation delay and spectrum sharing maximized.

**Keywords:** RoLa, Distributed Queuing , IIoT, Cognitive Radio.

## 一、前言

物聯網(Internet of Things, IoT) 是一個具有唯一地址且萬物可互相連結的全球性網路, 它可透過任何網路及任何服務, 允許任何人、任何物在任何時間、任何地點互相通訊連結[1]。因此物聯網的應用涵蓋範圍相當廣泛, 包含智慧型感測器、智慧家庭應用、環境監測及工廠自動化等, 然而這些物聯網應用必須藉由無線傳輸技術才能達到無所不在的資訊存取及無縫接軌互動式通訊目的[2]。

將大規模智慧終端裝置和網路技術融合在工業生產及工業製造當中, 實現生產自動化及提高生產可靠度和可控制性, 此即所謂的工業物聯網(Industrial IoT, IIoT)。而工業物聯網的崛起及普及, 必將引起第四次工業革命的發生, 亦即引領工業4.0的到來。然而, 要達到工業物聯網的要求必須有新的通訊技術才得以實現[3]。

低功率廣域網路 (Low-power Wide Area Network, LPWAN) 是一個新興的通訊技術, 它可以讓無線通訊達到長距離的傳輸, 在許多應用上, 可解決蜂巢式網路或短距離的無線通訊的問題, 亦可進行功能上的互補。對於大範圍區域、低傳輸速率且擁有大量低功耗終端節點的物聯網應用, LPWAN也能提供有效率的能量利用[4]。

LPWAN組成包含LoRa實體層及LoRaWAN媒介存取層。LoRa(Long Range)是一個可提供長距離(最遠可達20公里)、低傳輸速率(0.3kbps到27kbps)且低功耗(電池壽命長)的新技術, 且基礎設施建置與營運成本較低廉。在許多物聯網應用中, 如智慧城市、貨物追蹤及健康偵測即需要這樣的無線傳輸特性[5,6]。

LoRa是設計給需要低功耗且長距離物聯網應用的展頻調變技術, 即使在很低的資料輸出情況下, 對於雜訊仍然具備很高的強健性, 因此非常適合在工業物聯網中[7]。而LoRaWAN是建構在LoRa實體層之上的媒介存取控制協定, 以純

ALOHA(Pure ALOHA, P-ALOHA)協定為基礎, 然而P-ALOHA在高負載的情況下容易產生壅塞, 使得P-ALOHA不具備擴展性[8]。

LoRaWAN媒介存取層以星狀拓樸組成網路架構, 閘道負責終端節點與伺服器的連結, 終端節點透過單一跳躍(Single Hop)將資料送到閘道, 閘道透過非LoRaWAN網路(如蜂巢式網路或乙太網路)連結到伺服器。LoRaWAN資料傳輸以從終端節點送到閘道的上傳為主, 但仍具備雙向通訊功能[9]。

LoRaWAN的一個重要問題是以P-ALOHA協定為基礎。當終端節點有資料要傳送時會立即隨機傳送, 並等待閘道的回應。然而不同終端節點有可能使用相同展頻因子、相同通道在相同時間送出資料, 因此導致資料碰撞而降低系統效能。當資料流量增加時, 碰撞的情況將更形嚴重。

在工業物聯網中, 也常會面臨一些確定性的資料流量, 如採取傳統隨機傳送的P-ALOHA協定將無法達成。因此LoRaWAN必須有其他協定方法來取代P-ALOHA或採取混合式ALOHA協定設計才行。而時間分割多重存取(Time Division Multiple Access, TDMA)可依據時槽和可使用的通道分配資源給以ALOHA為基礎的通訊存取, 因此TDMA可以提供即時和非即時的資料傳輸並確保資料傳輸的公平性[9]。

在LoRa的物聯網中, 當使用較高的展頻因子時將會增加封包傳輸時間(Time of Air, ToA), 尤其在網路邊緣的終端節點所送出的封包, 其封包碰撞機率將顯著增加, 因此如何保持LoRa通訊的可靠度將是一項嚴重的挑戰。在[10]中, 作者提出RS-LoRa的媒介存取控制協定, RS-LoRa藉調整終端節點的傳輸功率以降低封包碰撞並改善LoRaWAN可靠度及擴展性。在[11]中, 作者提出一個改良P-ALOHA隨機傳送協定的時槽式ALOHA (Slotted ALOHA, S-ALOHA)機制, 藉提供同步機制以改善LoRaWAN封包遺失和系統效能, 但此方法無法提供即時流量傳遞延遲的保證。

在[12]中，作者提出針對LoRaWAN網路中類別A終端裝置同步及行程安排機制，透過網路伺服器來安排資料傳輸上行及下載的行程。每一個終端裝置必須與網路伺服器同步，藉由對伺服器提出資料傳輸的要求以獲得所安排的時槽。

在[13]中，作者提出一個on-demand LoRa的媒介存取控制協定，此協定包含unicast和multicast TDMA兩種機制。進行unicast TDMA機制時，閘道對單一終端節點發出wake-up的訊框；進行multicast TDMA機制時，閘道對數個終端節點發出wake-up的訊框。然而on-demand LoRa的資料傳輸是由閘道決定並非由終端節點決定，對於需要非週期性傳輸的物聯網終端節點並不適用。在[14]中，作者提出一個可以支援即時流量的媒介存取控制協定，然而此方法不能提供非即時流量的資料傳輸。

由於TDMA機制仍然存在碰撞的問題，尤其當流量增加時碰撞問題將更形嚴重。為了解決碰撞的問題，在[15]中，作者首先提出分散式佇列隨機存取協定(Distributed Queuing Random Access Protocol, DQRAP)，DQRAP可以讓終端節點共享同一個通道且與終端節點數量無關。DQRAP的好處是不會增加封包的傳遞延遲，因此不會影響系統輸出。DQRAP有兩個佇列一個是資料傳輸佇列(Data Transmission Queue, DTQ)，一個是碰撞解析佇列(Collision Resolution Queue, CRQ)。[16]作者在分散式佇列媒介存取控制協定中，只用3個碰撞競爭時槽即讓系統輸出達到很好的效果。

兩個可適用於有線且有中央基礎架構網路的延伸式DQRAP(Extended DQRAP)[17]和具優先傳輸DQRAP(Prioritized DQRAP)[18]被提出來。在延伸式DQRAP中增加了碰撞競爭時槽的數量；在具優先傳輸DQRAP中，具優先傳輸的封包具備優先傳輸的順序。[19]作者將DQRAP應用在具有長傳遞延遲的衛星通訊環境中。

[20]作者提出DQRAP與編碼分割多重存取(Code Division Multiple Access, CDMA)結合的

DQRAP/CDMA方法，並將此方法應用在3G蜂巢式網路中，以改善隨機存取輸出量、系統輸出穩定度及傳遞延遲。[21]作者提出具備差異式服務品質保證的DQRAP，藉此改善系統輸出量及封包傳遞延遲。

[22]作者提出在單一跳躍群集式架構之無線隨意網路DQ MAC協定，藉此改善系統輸出量及封包傳遞延遲。[23]作者提出一個合作式的DQ MAC協定，藉由中繼節點的互助合作克服碰撞的問題。

[24]作者提出在一個具有低傳輸功率、大量終端節點及有突發性流量的低功率分散式佇列(Low-Power Distributed Queuing, LPDQ)MAC協定。LPDQ在低流量時，依訊框時槽式ALOHA(Frame Slotted ALOHA, FSA)自行安排資料傳輸；當流量增加時，依據TDMA機制克服碰撞的問題。[25]作者提出在LoRa實體層之上建置分散式佇列媒介存取控制協定稱為DQ-LoRa，作者證明DQ-LoRa在系統輸出、傳遞延遲及能量消耗比時槽式ALOHA具有很好的改善效果。

[26]作者提出可以支援LoRa即時資料傳輸媒介存取控制協定稱為RT-LoRa，並將此協定應用在IIoT。RT-LoRa為中央基礎架構MAC協定支援週期性即時和非週期性非即時流量，RT-LoRa非週期性資料傳輸使用S-ALOHA，但不支援失敗重傳，而週期性即時流量使用TDMA機制。

無線通訊系統在資料傳輸時，必須做到避免與其他無線通訊系統的互相干擾，因此現今大多數的無線頻譜已被固定式的授權給一些傳統的通訊系統，如電視系統等。根據研究顯示，這些固定式的公用無線頻譜，在大多數的時間裡，在相同時間、地點，無線頻譜使用效率的變動範圍高達15%至85%，也就是說高達85%至15%的頻譜是被浪費的。因此如果能在無線頻譜空閒階段時，把頻段暫時讓給其他需要傳輸資料的無線使用者使用，便能提升無線頻譜使用效率，這就是感知無線的基本概念[27]。

本論文將於 LoRa 工業物聯網中以感知無線為基礎設計一個多重通道單一跳躍(Multichannel、Single hop)之改良分散式佇列即時和非即時資料傳輸 MAC 協定。在感知無線環境下，以 LoRa 為基礎設計滿足工業物聯網中即時和非即時資料傳輸的單一跳躍改良 DQ MAC 協定設計。一般 DQ MAC 協定，終端節點採隨機選擇競爭時槽，本論文將以終端節點剩餘能量來決定競爭時槽以降低節點能量消耗及降低傳遞延遲。而感知無線多重通道功能將可解決節點流量壅塞所衍生碰撞的問題，感知無線也可解決 LoRaWAN 最大工作週期調變的限制，藉此提升系統輸出量，然而在感知無線多重通道環境下必須解決多重通道隱藏節點問題，才能滿足資料傳遞延遲 QoS 及頻譜共享最大化。

接下來透過模擬分析，探討於 LoRa 工業物聯網中以感知無線為基礎設計一個多重通道單一跳躍(Multichannel、Single hop)之改良分散式佇列即時和非即時資料傳輸 MAC 協定之系統輸出及傳遞延遲。

本論文其餘章節安排如下，第二章將介紹相關研究。第三章說明本論文所提出來的 LoRa 工業物聯網中以感知無線為基礎之媒介存取協定，第四章介紹模擬環境與結果分析，第五章提出結論。

## 二、相關研究

使用ISM非授權頻譜雖然沒有付費問題，然而 LoRaWAN 的效能受到ISM非授權頻譜工作週期調變的限制。最大工作週期定義為一個終端節點佔據一個通道時間之最大百分比，使得工作週期變成非授權頻譜網路運作的一個關鍵限制。因此 LoRaWAN 在每次資料傳輸時必須進行虛擬隨機通道跳頻以符合最大工作週期的限制[9]。

如果  $d$  代表在一個次頻帶(sub-band)的最大工作週期，資料傳輸時間(Time on air, ToA)以  $T_a$  表

示，則每一個終端節點在一個次頻帶的最小等待期(off-period)  $T_s = T_a(\frac{1}{d} - 1)$ 。以EU 868 ISM頻譜的最大工作週期只有1%為例，亦即每一個終端節點在每一個次頻帶一小時內的最大傳輸時間只有36秒。由此可知ISM非授權頻譜工作週期調變對系統效能影響甚鉅[9]。因此如何解決最大工作週期過低的困境變成是LoRa的一項重要課題。

感知無線的主要概念是當主要使用者(Primary Users, PUs)的授權頻譜(Licensed Spectrum)空閒時，次要使用者(Secondary Users, SUs)尋找適當的頻譜機會(Spectrum Opportunity)，在不干擾PUs及不與其他SUs互相干擾的情況下，暫時使用此授權頻譜完成通訊的目地，使得整個無線資源的利用率達到最佳化的技術，這個概念被稱為動態頻譜存取(Dynamic Spectrum Access)和感知無線網路(Cognitive Radio Networks, CRNs)。由於感知無線技術具備動態頻譜感測與取得的特性[27]，因此如能將感知無線應用在LoRa環境中，將可解決LoRa使用ISM非授權頻譜最大工作週期過低的問題，也能提升LoRaWAN網路的效能及降低終端節點能量消耗[9]。

事實上，目前已經可以透過資料庫查詢獲取電視白頻段授權頻譜的空閒時間並加以利用，然而 LoRaWAN 並沒有設計在電視白頻段(TV White Spaces)上的機制[9]。而本論文將感知無線技術與 LoRaWAN 結合，藉由感知無線技術提升系統輸出量及降低終端節點的能量消耗。然而LoRa在感知無線環境下的媒介存取控制協定必須在多重通道下克服兩個碰撞問題：一個是IIoT終端節點之間的碰撞；另一個是PUs與IIoT終端節點之間的碰撞。因此如何設計一個LoRa在IIoT環境下的感知無線多重通道媒介存取控制協定，在不干擾PU的前提下，解決隱藏終端節點的問題，提升通道使用效率以提升系統輸出量，且能降低系統終端節點能量消耗，也是本論文要克服的議題。

分散式佇列隨機存取協定(Distributed Queuing Random Access Protocol, DQRAP)首先由[15]作者在M/D/1佇列環境中所提出來，作者證明在DQ MAC協定之下系統效能和有多少終端節點共享一個通道傳送資料無關，這表示系統效能不會受到流量的影響。在M/D/1佇列環境中，當負載很低時終端節點可以即時取得通道，當負載很大時可以快速地進入保留系統，系統被切割成許多週期，每個週期包含m個競爭時槽和一個資料時槽，在競爭時槽取得資料通道的節點可以在資料時槽傳送資料。然而M/D/1佇列環境中所傳送的資料必須是固定封包大小且在固定大小的時槽間隔內傳送，且每一個週期只允許一個節點傳送一個封包，贏得競爭的節點必須依序在不同週期傳送封包[16]。

[15, 16]作者在競爭週期皆使用三個競爭時槽。而[17]作者在競爭週期只使用一個競爭時槽，因此競爭時槽只有成功、空閒及碰撞三種情況會發生，參與競爭節點可以立即得知是否競爭成功。[18]作者提出PDQRAP(Priority DQRAP)，每一個節點依照優先權分類在不同的競爭時槽競爭。[19]作者提出在M/M/1佇列環境中，DQ MAC協定和CDMA結合應用在移動通訊網路中的效能分析探討。

在[15-19]中，作者在single hop環境中使用一個或三個競爭時槽，且每一個CAP週期只允許一個節點傳送一筆固定大小資料封包。因此，雖然分散式佇列依競爭碰撞的順序可以依序解析將資料傳送出去，但還是會造成傳遞延遲。

因此本論文將探討在多重通道單一跳躍感知無線LoRa工業物聯網環境中，流量對競爭週期時槽個數的關係，藉由節點剩餘能量多寡決定競爭時槽，以提升系統輸出量及降低傳遞延遲；且一個CAP週期內允許競爭成功終端節點連續占用多個資料時槽傳送多筆資料。

[25]作者提出在LoRa實體層之上建置分散式佇列媒介存取控制協定DQ-LoRa，DQ-LoRa允許一個CAP週期內競爭節點依DQ演算法依序將資料傳

送出去。然而DQ-LoRa在每一個Beacon Interval期間，和[16]作者所提方法一樣，依然最多只能傳送一個封包且所傳送資料必須固定大小。[26]作者提出在IIoT環境下支援LoRa即時資料傳輸媒介存取控制協定RT-LoRa。RT-LoRa利用TDMA支援週期性即時流量；利用S-ALOHA支援非週期性非即時流量，但不支援失敗重傳。

### 三、LoRa 工業物聯網中以感知無線為基礎之媒介存取協定

本論文將於LoRa工業物聯網中以感知無線為基礎，設計一個多重通道單一跳躍改良分散式佇列媒介存取控制協定支援即時和非即時資料傳輸，以確保IIoT在感知無線環境下能提升系統輸出量、降低終端節點能量消耗及降低傳遞延遲時間。

在LoRa工業物聯網環境中，如能克服感知無線的問題，多重通道將能解決單一通道面臨的問題。實際將感知無線應用於IIoT環境中仍然有許多問題須克服。這些問題包含：如何確保multichannel資料傳送、如何在multichannel環境中克服隱藏節點並安排通道、如何在不干擾PU的條件下來使用PU通道、如何在PU通道之間成功轉換及如何在多重通道環境中同時避免多重通道隱藏節點。

為了增加系統效能，本論文將利用感知無線技術感測LoRa工業物聯網空閒PU通道，在不干擾PU的情況下借用PU空閒通道。然而感知無線之多重通道將使環境變得更加複雜，因此MAC協定設計必須考慮如何在不干擾PU的條件下機會式的使用PU空閒通道。為了解決LoRaWAN的P-ALOHA終端節點碰撞問題，本論文也將DQ演算法加入感知無線LoRa工業物聯網的MAC協定中。為改善DQ演算法傳遞延遲問題，將以節點剩餘能量決定競爭時槽。

由於在LoRa工業物聯網延長系統生命時間及

確保傳遞延遲 QoS 的要求，因此本論文也將探討以感知無線為基礎實現多重通道 IIoT 環境下即時和非即時資料傳送之改良 DQ MAC 協定，使系統更能符合實際環境的需求並提升系統效能。

本論文所提於 LoRa 工業物聯網中以感知無線為基礎之改良分散式佇列媒介存取控制協定，為了避免干擾感知無線的 PU 節點，系統時間將資料通道分割為多個 Beacon Interval，Beacon Interval 的長度大小將隨節點即時流量而調整，但最大值設定為不干擾感知無線 PU 節點的最大容忍度。每個 Beacon Interval 再區分為感測週期 (Sensing Period)、競爭存取週期 (Contention Access Period, CAP)、免競爭週期 (Contention-Free Period, CFP)、downlink, CFP Ack 五個部分 (圖 1)。

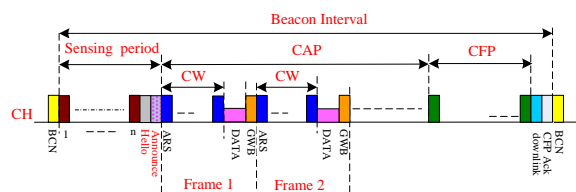


圖 1 於 LoRa 工業物聯網中以感知無線為基礎多重通道單一跳躍改良分散式佇列 MAC 協定。

因此本論文於 LoRa 工業物聯網中以感知無線為基礎之多重通道單一跳躍之改良分散式佇列 MAC 協定中，各個相位功能說明如下：

#### 第一相位之感測視窗 (Sensing Window):

此相位目的在避免與 PU 節點正在使用通道的干擾，閘道經由感測週期得到可使用的 PU 通道，閘道統計 PU 借用成功機率，依據此成功機率從可使用 PU 通道動態挑選一個最穩定通道當作資料通道。

#### 第二相位稱為競爭存取週期 (Contention Access Period, CAP):

在此相位中想要進行資料傳輸的 IIoT 節點，必須在資料通道透過此競爭視窗進行通道的取得，此相位也將針對感知無線多重通道 LoRa 工業物聯網系

統中隱藏節點 SU 問題，提出解決機制。在此相位中，要進行資料通訊的 IIoT 終端節點依據第二相位競爭，進行通道存取確認。此相位包含：

#### (1) 存取要求序列 (Access Request Sequence, ARS):

想要傳送資料給閘道的終端節點在競爭視窗依節點剩餘能量多寡挑選一個競爭時槽並送出 ARS，每一個時槽會有成功、空閒及碰撞三種情況，再利用改良分散式佇列 MAC 協定依序解析。在此將依節點剩餘能量多寡分為數個等級，每個等級對應到不同的競爭時槽，因此可以降低節點能量消耗及降低傳遞延遲。

#### (2) 資料傳送 (Data):

在前一個競爭週期依改良分散式 MAC 協定成功競爭的節點可以在此傳送資料，但如果沒有任何一筆 ARS 成功則閘道直接送出 GWB。

#### (3) 閘道廣播 (Gateway Broadcast, GWB):

閘道將 ARS 競爭結果及成功傳送 ARS、DATA 的節點廣播出去給終端節點。

#### 第三相位之免競爭週期 (Contention-Free Period, CFP):

提供即時從終端節點到閘道的單方向資料上傳 (uplink)，時槽採用 TDMA 機制並安排給已經確認且週期性的資料傳輸。

#### 第四相位之 downlink:

提供閘道要下傳資料或命令給終端節點使用。

#### 第五相位之 CFP Ack:

提供閘道針對 CFP 週期的確認。

在圖 1 中，每個參與 IIoT 的終端節點均必須依照上列五個相位進行通道感測、競爭存取、免競爭存取、通道釋放等幾個步驟。為了更切合實際情況，PU 並不參與整個媒介存取控制協定的運作，每一個控制訊框將以最大可允許的傳輸功率進行。

因此本論文將規劃下列六個方向：

第一：將感知無線技術與 LoRaWAN 結合之改良分

散式佇列媒介存取控制協定設計。

第二：依流量調整之適應性競爭週期時槽個數之改良分散式佇列媒介存取控制協定設計。

第三：CAP 週期內允許競爭成功節點連續傳送多筆資料之改良分散式佇列媒介存取控制協定設計。

第四：支援即時和非即時資料傳輸之改良分散式佇列媒介存取控制協定設計。

第五：以節點剩餘能量多寡決定挑選競爭時槽之改良分散式佇列媒介存取控制協定設計。

第六：服務品質保證之改良分散式佇列媒介存取控制協定設計。

為了確保能量消耗及資料傳輸 QoS 延遲時間在允許範圍內，及系統輸出量也能達到最大化。本論文也將確保系統會有最佳的網路生命時間 (Network Life Time)，網路生命時間定義為系統開始運作之後至第一個終端節點能量耗盡所持續的生命時間長短。為完成以上目標，接下來將針對 LoRa 工業物聯網中以感知無線為基礎之改良分散式佇列媒介存取控制協定設計細節說明：

## 1.動態資料通道(Dynamic Data Channel；DDC)設計

### 第一相位之感測視窗(Sensing Window)

第一相位開始，閘道及每一個終端節點都必須對 PU 通道進行感測。之後使用 IEEE 802.11 之計時同步功能(Timer Synchronization Function, TSF)進行同步，閘道傳送自己的 BCN 訊框，此 BCN 訊框攜帶自己在資料通道的區域時間(Local Time)，其他 single hop 鄰居之終端節點收到此 BCN 訊框時間，就更新自己的時間。在第一相位中，閘道及終端節點將維護一個通道狀態記錄表，此表記錄閘道及終端節點借用 PUs 空間通道進行資料傳輸的成功次數、失敗次數與成功機率。

在先前的參考文獻中，大都是切換至每一個通道進行感測，但對每一個通道感測容易消耗能量。因此本論文將利用成功機率來決定是否要對每一個通道進行感測，因此所提協定將能因對通道選擇

性感測減少能量消耗。

### 第二相位之競爭存取週期(Contention Access Period, CAP)

進行一般資料傳輸之終端節點必須經由 ARS/DATA/GWB 之改良版 DQ MAC 競爭機制取得通道傳輸的權限。因碰撞未能成功送出 ARS 訊框，必須在競爭週期內，透過倒退機制在 CAP 週期結束之前重新競爭，如仍未能成功進行控制訊框交換必須等待下一個 CAP 週期才能再進行通道競爭。

ARS 訊框是每一個終端節點要進行資料傳輸時對閘道所提出的傳輸要求訊框，在 ARS 子週期中可依據終端節點流量調整 ARS 時槽個數，因此在執行完此 ARS 子週期，在不同時槽可能同時存在競爭成功的終端節點。

在 ARS 子週期中，終端節點將依剩餘能量多寡決定競爭優先權，剩餘能量愈低的終端節點將擁有較高傳輸權限，且依剩餘能量多寡挑選不同的競爭時槽。ARS 競爭成功終端節點即獲得傳送資料的權限。競爭失敗的終端節點依改良版 DQ MAC 演算法解析排序傳送資料。

GWB 訊框是閘道對終端節點的廣播訊框，閘道透過 GWB 將 ARS 競爭結果廣播出去。

### 第三相位之免競爭週期(Contention-Free Period, CFP)

提供終端節點即時對閘道的單方向資料上傳(uplink)，時槽採用 TDMA 機制並安排給已經確認且週期性的資料傳輸。

### 第四相位之 downlink

提供閘道要下傳資料或命令給終端節點使用。

### 第五相位之 CFP Ack

提供閘道針對 CFP 週期的確認。

## 2.感測週期控制訊框功能

**Hello**：閘道用來通知終端節點加入 IIoT 的資料通道確認訊框。



**Announce**：當一個新終端節點要加入 IIoT 或舊終端節點要離開 IIoT 所發出的訊框。

### 3.競爭週期控制訊框功能

**ARS**：訊框內容包含終端節點對閘道提出資料傳送所需通道及預計要傳送資料時間多寡的要求。終端節點將資料通道 ID 及資料傳輸時間放在 ARS 中。ARS 訊框也包含終端節點 ID 及終端節點剩餘電池能量  $Power_{res}$ 。

**GWB**：閘道之競爭視窗結果廣播，乃閘道對競爭視窗時槽經過終端節點競爭之後的確認訊框廣播。

**DATA**：終端節點透過競爭機制成功取得通道，便可進行資料傳輸。終端節點在一開始對系統所提出占用通道時間結束時，如要進行更多資料傳送就必須回到下一個 Beacon Interval，再次透過競爭週期之通道感測、通道競爭、通道取得及通道釋放等步驟。此目的在避免終端節點佔用 PU 通道太長時間。

**INT**：當閘道感測到 PU 節點啟動之後，閘道將對已經進行資料傳輸的終端節點透過資料通道傳送一個中斷訊框，要求終端節點中斷資料傳輸，以降低終端節點對隱藏節點 PU 節點的干擾。INT 中斷訊框為所有控制訊框中優先權最高之控制訊框，可在資料通道隨時發出。

### 4.於 LoRa 工業物聯網中以感知無線為基礎改良分散式佇列媒介存取控制協定之表格維護及訊框欄位設計

為了達成以上目標，將規劃本論文所提 MAC 協定之表格及控制訊框格式。於 LoRa 工業物聯網中以感知無線為基礎，終端節點必須維護一個通道狀態記錄表、一個 HELLO 記錄表及一個鄰居節點表。藉由閘道與終端節點的 Sensing

period/CAP/CFP/downlink/CFP link 五個步驟的控制訊框交換，進行資料傳輸機制，並克服終端節點間多重通道隱藏節點問題，當隱藏節點問題能夠解決之後，將能降低節點能量消耗及提升系統輸出量。接下來是此 MAC 協定之表格及訊框欄位設計說明：

#### (1)BEACON 記錄表

每一個終端節點必須維護一個 Beacon 記錄表，此表記錄閘道發出 Beacon 訊框之成功次數 ( $N_{BCNsus}$ )、失敗次數 ( $N_{BCNfail}$ ) 與成功機率 ( $P_{BCNsus}$ )。Beacon 記錄表具有以下欄位(圖 2):  $CDC_{Id}$ ,  $GW_{Id}$ ,  $N_{BCNsus}$ ,  $N_{BCNfail}$ ,  $P_{BCNsus}$ 。 $CDC_{Id}$  是閘道所選定的動態資料通道； $GW_{Id}$  是閘道的編號。

$CDC_{Id}$	$GW_{Id}$	$N_{BCNsus}$	$N_{BCNfail}$	$P_{BCNsus}$
------------	-----------	--------------	---------------	--------------

圖 2 Beacon 記錄表的欄位格式。

#### (2)通道狀態記錄表(Channel Status Recording Table, CSRT)

閘道維護一個通道狀態記錄表，CSRT 記錄每一個通道取得成功次數 ( $N_{CHsuccess}$ ) 與失敗次數 ( $N_{CHfail}$ )。閘道選擇一個通道依據成功機率來決定。 $CDC_{Id}$  是閘道所選定的動態資料通道。 $GW_{Id}$  是閘道的編號。 $P_{CHsuccess}$  表示通道成功機率。 $P_{CHthreshold}$  表示是否要進行通道感測之最低臨界機率。通道狀態記錄表具有以下欄位(圖 3):  $CDC_{Id}$ ,  $GW_{Id}$ ,  $N_{CHsuccess}$ ,  $N_{CHfail}$ ,  $P_{CHsuccess}$ ,  $P_{CHthreshold}$ 。

$CDC_{Id}$	$GW_{Id}$	$N_{CHsuccess}$	$N_{CHfail}$	$P_{CHsuccess}$	$P_{CHthreshold}$
------------	-----------	-----------------	--------------	-----------------	-------------------

圖 3 通道狀態記錄表的欄位格式。

#### (3)鄰居節點表(Neighbor Node Table, NNT)

每個終端節點必須記錄傳輸範圍內的閘道、鄰居及 PUs。此表目的在協助終端節點在 LoRa

工業物聯網環境之多重通道中克服隱藏節點問題時，所必須知道閘道及終端節點間彼此鄰居關係。此表的建立將藉由收到 ARS/GWB 等控制訊框來建立，並藉此知道鄰居終端節點與 PUs 節點所使用通道狀況。鄰居節點表具有以下欄位（圖 4）： $CDC_{Id}$ ， $GW_{Id}$ ， $PU_{Id}$ ， $Nbr_{Id}$ 。 $CDC_{Id}$  是閘道所選定的資料通道。 $GW_{Id}$  是閘道的編號。 $Nbr_{Id}$  表示鄰居節點編號； $PU_{Id}$  表示鄰居 PU 節點編號。

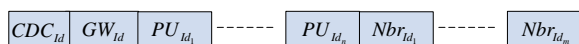


圖 4 鄰居節點表的欄位格式。

#### (4) 訊框格式

**Beacon:** 閘道對鄰居終端節點所發出同步訊框。具有以下欄位： $CDC_{Id}$ ， $GW_{Id}$ ， $Timer$ （圖 5）。 $CDC_{Id}$  是閘道所選定的動態資料通道； $GW_{Id}$  是閘道的編號； $Timer$  是閘道計時器。

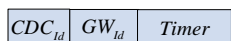


圖 5 Beacon 的欄位格式。

**Hello:** 閘道對鄰居終端節點所發出通道確認訊框。具有以下欄位： $CDC_{Id}$ ， $GW_{Id}$ ， $CW_{Length}$ （圖 6）。 $CDC_{Id}$  是閘道所選定的動態資料通道。 $GW_{Id}$  是閘道的編號。 $CW_{Length}$  是 CAP 週期競爭視窗時槽個數。

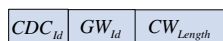


圖 6 Hello 的欄位格式。

**Announce:** 新的終端裝置加入或原來終端裝置要離開對閘道和鄰居節點所發出確認訊框。具有以下欄位： $CDC_{Id}$ ， $GW_{Id}$ ， $SU_{Id}$ （圖 7）。 $CDC_{Id}$  是閘道所選定的動態資料通

道。 $GW_{Id}$  是閘道的編號。 $SU_{Id}$  是終端裝置編號。



圖 7 Announce 的欄位格式。

**ARS:** 欄位包含  $CDC_{Id}$ ， $SU_{Snd}$ ， $GW_{Id}$ ， $SU_{Id}$ ， $Power_{Res}$ ， $NAV_{CHid}$ （圖 8）。 $CDC_{Id}$  是閘道所選定的資料通道； $SU_{Snd}$  指終端節點； $GW_{Id}$  是閘道的編號； $SU_{Id}$  是  $SU_{Snd}$  之 single hop 鄰居終端節點編號； $Power_{res}$  是終端節點所剩餘電池能量； $NAV_{CHid}$  是終端節點資料傳輸預估時間。



圖 8 ARS 欄位格式。

**GWB:** 閘道通道廣播乃閘道對競爭視窗經過終端節點競爭之後的確認訊框。具有以下欄位： $CDC_{Id}$ ， $GW_{Id}$ ， $Status_{Slot}$ （圖 9）。 $CDC_{Id}$  是閘道所選定的動態資料通道； $GW_{Id}$  是閘道的編號； $Status_{Slot}$  是指競爭視窗每一個競爭時槽經過終端節點競爭之後的狀態(成功、碰撞及空閒)。

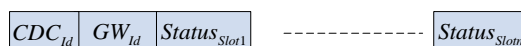


圖 9 GWB 欄位格式。

**downlink:** 閘道下傳給終端節點資料或命令之時槽。具有以下欄位： $CDC_{Id}$ ， $GW_{Id}$ ， $SU_{Id}$ ， $Data\ or\ Command$ （圖 10）。 $CDC_{Id}$  是閘道所選定的資料通道； $GW_{Id}$  是閘道的編號； $SU_{Id}$  是指終端節點； $Data\ or\ Command$  是指閘道下傳給終端節點的訊息。

$CDC_{ld}$	$GW_{ld}$	$SU_{ld}$	Data or Command
------------	-----------	-----------	-----------------

圖 10 downlink 的欄位格式。

**CFP ack:** 閘道收到終端節點在 CFP 週期所傳送資料之後的確認訊框。具有以下欄位：

$CDC_{ld}$ ,  $GW_{ld}$ ,  $SU_{ld}$  (圖 11)。

$CDC_{ld}$	$GW_{ld}$	$SU_{ld}$
------------	-----------	-----------

圖 11 CFP ack 欄位格式。

**INT:** 在 PU 傳輸範圍內的閘道感測到 PU 節點啟動之後，對已經進行資料傳輸的終端節點透過資料通道傳送一個最高優先權的中斷訊框，能降低對 PU 的干擾機率。具有以下欄位： $CDC_{ld}$ ,  $GW_{ld}$ ,  $SU_{ld}$  (圖 12)。 $CDC_{ld}$  是閘道所選定的動態資料通道； $GW_{ld}$  是閘道的編號； $SU_{ld}$  是指終端節點。

$CDC_{ld}$	$GW_{ld}$	$SU_{ld}$
------------	-----------	-----------

圖 12: INT 的欄位格式。

#### 四、模擬與討論

本系統由 4 個 PU 節點及 400 個 SU 節點所組成，分布在 1200 x 1200 平方公尺範圍內。假設所有 SU 節點電源都維持在開的狀態，在沒有開始調整傳輸範圍之前，控制訊框的傳輸範圍固定在 250 公尺，系統模擬時間為 20,000 秒，4 個 PU 位置固定在 (300, 300), (900, 300), (300, 900), (900, 900)，即總共有 4 個資料通道。另外系統還有一個獨立的控制通道。

每一筆資料都經 10 次模擬結果取平均值，為了避免因路徑問題，整個網路拓模圖共均分為 100 個區塊，所有 400 個 SU 節點平均分布在 100 個區塊內。在此定義離開比率為單位時間內中斷連線數量；到達比率為單位時間內建立連線數量。假設系統資料流量為均勻分佈 (Uniformly distributed)，平均每一秒資料離開比率固定為 0.05，平均每一秒資料到達比率為從 1 到 512。若

到達比率為 64 表平均每一秒到達的資料連線為 64。每一個 PU 通道頻寬為 2Mbps。

在圖 13 中，當 PU 啟動的數量為 0 且到達比率為 224 時，系統有最大輸出量 0.402Mbps。當 PU 啟動的數量增加時，系統輸出量將隨著減少。從圖 13 可知，隨著到達比率慢慢增加，系統輸出量將慢慢增加。但當到達比率為 224 時，系統即達到飽和。此時到達比率再增加時，系統輸出量將遞減。

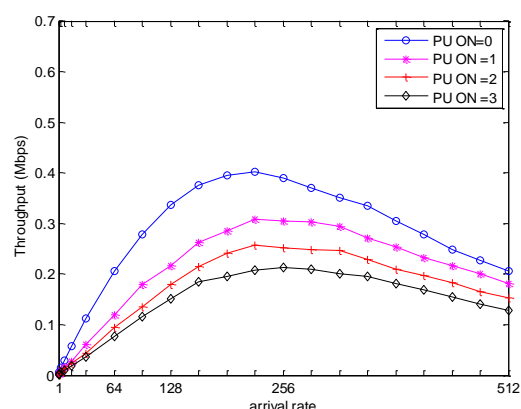


圖 13 以 LoRa 為基礎工業物聯網中相對於 PU 開啟數量的系統輸出量比較。

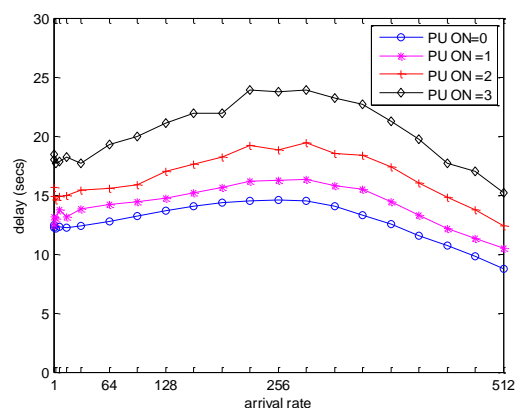


圖 14 以 LoRa 為基礎工業物聯網中相對於 PU 開啟數量的傳遞延遲比較。

在圖 14 中，當 PU 啟動的數量為 3 且到達比率為 288 時，系統有最大傳遞延遲 23.92 secs。當 PU 啟動的數量增加時，系統傳遞延遲將隨著增加。本論文所討論的傳遞延遲是指成功連線的傳遞延遲時間，因此當系統飽和之後，成功連線數量也會降低。此時到達比率再增加時，成功連線數量降

低且系統傳遞延遲遞減。

當部分網路節點因能量消耗殆盡結束生命將因而中斷部分連線且降低系統輸出。本論文改良分散式佇列機制以節點剩餘能量多寡決定競爭時槽，剩餘能量較少節點將減少競爭以節省能量，以確保網路生命週期的延長進而提升網路輸出。

## 五、結 論

本論文研究於LoRa工業物聯網中以感知無線為基礎改良分散式佇列媒介存取控制協定，藉由改良分散式佇列媒介存取控制協定探討無線網路系統輸出量及資料傳遞延遲。當PU 啟動的數量為0且到達比率為224時，系統達到飽和狀態有最大輸出量0.402Mbps。當PU 啟動的數量為3且到達比率為288時，系統有最大傳遞延遲23.92 sec。當PU 啟動的數量增加時，SU可用通道減少，SU彼此之間競爭增加，系統輸出量將隨著減少且系統傳遞延遲也隨著增加。從本協定設計可得知在無線資料傳輸網路系統中，當建立連線數量達到一定值時系統輸出量即達飽和，若連線數量持續增加，系統會因超載而使系統輸出逐漸下降。因此本協定可透過模擬針對系統環境找到最佳連線數。

## 誌 謝

感謝審稿委員的辛苦，讓本篇論文能更加完善。也感謝南華大學校內專題計畫的支持，計畫編號為 Y109000045，使本論文得以順利進行，特此致上感謝之意。

## 參考文獻

- [1] A. A. Khan, M. H. Rehmani and A. Rachedi, "Cognitive-Radio-Based Internet of Things: Applications, architectures, spectrum related functionalities, and future research directions," *IEEE Wireless Comm.*, vol. 24, no. 3, pp. 17–25, Jun. 2017.
- [2] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswami, "Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions," *Future Gener. Comput. Syst.*, vol. 29, no. 7, pp. 1645–1660, Sep. 2013.
- [3] L. Leonardi, F. Battaglia, and L. LoBello, "Industrial LoRa: a Novel Medium Access Strategy for LoRa in Industry 4.0 Applications," *IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Washington, DC, USA, Oct. 2018.
- [4] M. Luvisotto, F. Tramarin, L. Vangelista, and S. Vitturi, "On the Use of LoRaWAN for Indoor Industrial IoT Applications," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2018, pp. 1–11, 05 2018.
- [5] M. Centenaro, L. Vangelista et al., "Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the IoT and smart city scenarios," *IEEE Wireless Communications*, vol. 23, no. 5, pp. 60–67, October 2016.
- [6] M. Bor, J. Vidler, and U. Roedig, "LoRa for the Internet of Things," in *EWSN 2016*, USA: Junction Publishing, 2016, pp. 361–366.
- [7] L. Tessaro, C. Raffaldi, M. Rossi, and D. Brunelli, "Lightweight Synchronization Algorithm with Self-Calibration for Industrial LoRa Sensor Networks," in *MetroInd4.0&IoT 2018*, April 2018, pp. 259–263.
- [8] W. Wu, Y. Li, Y. Zhang, B. Wang, and W. Wang, "Distributed Queuing Based Random Access Protocol for LoRa Networks," *IEEE Internet of Things J.*, DOI:10.1109/JIOT.2019.2945327, pp. 1–10, Oct. 2019.
- [9] A. Ferran, V. Xavier, T.P. Pere, M. Borja, M-S Joan and W. Thomas, "Understanding the Limits of LoRaWAN," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 9, pp. 34–40, Sep. 2017.

- [10] B. Reynders, Q. Wang, P. Tuset-Peiro, X. Vilajosana et al., "Improving Reliability and Scalability of LoRaWANs Through Lightweight Scheduling," *IEEE Internet of Things J.*, vol. 5, no. 3, pp. 1830–1842, June 2018.
- [11] T. Polonelli, D. Brunelli, and L. Benini, "Slotted ALOHA Overlay on LoRaWAN: a Distributed Synchronization Approach," *ArXiv*, Sep. 2018.
- [12] J. Haxhibeqiri, I. Moerman, and J. Hoebeke, "Low Overhead Scheduling of LoRa Transmissions for Improved Scalability," *IEEE Internet of Things J.*, vol. 6, no. 2, pp. 3097–3109, April 2019.
- [13] R. Piyare, A. L. Murphy, M. Magno, and L. Benini, "On-Demand LoRa: Asynchronous TDMA for Energy Efficient and Low Latency Communication in IoT," *Sensors (Basel)*, vol. 18, no. 11, Nov. 2018.
- [14] M. Rizzi, P. Ferrari, A. Flammini, E. Sisinni, and M. Gidlund, "Using LoRa for industrial wireless networks," in *WFCS*, May 2017, pp. 1–4.
- [15] W. Xu and G. Campbell, "A near perfect stable random access protocol for a broadcast channel," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC)*, vol. 1, Jun. 1992, pp. 370–374.
- [16] W. Xu and G. Campbell, "A distributed queuing random access protocol for a broadcast channel," in *Proc. Conf. Commun. Archit., Protocols Appl. (SIGCOMM)*, New York, NY, USA, 1993, pp. 270–278.
- [17] C.T. Wu and G. Campbell, "Extended DQRAP (XDQRAP). A cable TV protocol functioning as a distributed switch," in *Proc. Int. Workshop Community Netw. Integr. Multimedia Services Home*, Jul. 1994, pp. 191–198.
- [18] H.J. Lin and G. Campbell, "PDQRAP-prioritized distributed queuing random access protocol," in *Proc. IEEE Conf. Local Comput. Netw.*, Oct. 1994, pp. 82–91.
- [19] C.T. Wu and G. Campbell, "Interleaved DQRAP with global TQ," Dept. Comput. Sci., Illinois Inst. Technol., Chicago, IL, USA, Tech. Rep., 1995.
- [20] L. Alonso, R. Agusti, and O. Sallent, "A near-optimum MAC protocol based on the distributed queuing random access protocol (DQRAP) for a CDMA mobile communication system," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 18, no. 9, pp. 1701–1718, Sep. 2000.
- [21] E. Kartsakli, A. Cateura, J. Alonso-Zarate, C. Verikoukis, and L. Alonso, "Cross-layer enhancement for WLAN systems with heterogeneous traffic based on DQCA," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 46, no. 6, pp. 60–66, Jun. 2008.
- [22] J. Alonso-Zarate, E. Kartsakli, L. Alonso, and C. Verikoukis, "Performance analysis of a cluster-based MAC protocol for wireless ad hoc networks," *EURASIP J. Wireless Commun. Netw.*, vol. 2010, no. 1, p. 619–625, 2010.
- [23] J. Alonso-Zarate, L. Alonso, C. Skianis, and C. Verikoukis, "Analysis of a distributed queuing medium access control protocol for cooperative ARQ," in *Proc. IEEE GLOBECOM*, Dec. 2010, pp. 1–5.
- [24] P. Tuset-Peiro, F. Vazquez-Gallego, J. Alonso-Zarate, L. Alonso, and X. Vilajosana, "LPDQ: A self-scheduled TDMA MAC protocol for single hop dynamic low-power wireless networks," *Pervasive Mobile Comput.*, vol. 20, pp. 84–99, Jul. 2015.
- [25] W. Wu, Y. Li, Y.H. Zhang, B. Wang, and W. Wang, "Distributed Queuing Based Random Access Protocol for LoRa Networks," *IEEE Internet of Things J.*, vol. 6, no. 1, pp. 1–9, Oct. 2019.
- [26] L. Leonardi, F. Battaglia, and L. LoBello,

- “RT-LoRa: A Medium Access Strategy to support Real-time flows over LoRa-based networks for Industrial IoT applications,” *IEEE Internet of Things J.*, vol. 6, no. 6, pp. 1-12, Sep. 2019.
- [27] A. A. Khan, M. H. Rehmani and A. Rachedi, “Cognitive-Radio-Based Internet of Things: Applications, architectures, spectrum related functionalities, and future research directions,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 24, issue 3, pp. 17–25, June 2017.
- [28] W. Zhou, Z. Tong, Z.Y. Dong, and Y. Wang, “LoRa-Hybrid: A LoRaWAN Based Multihop Solution for Regional Microgrid,” in *Proc. ICCCS*, Singapore, Feb. 2019.
- [29] J. Haxhibeqiri, E. D. Poorter, I. Moerman, and Jeroen Hoebeke, “A Survey of LoRaWAN for IoT: From Technology to Application,” *Sensors*, vol. 18, pp. 1–38, 2018.
- [30] H.K. Lee, J. Hwang, S.L. Kim and R. Jantti, “Throughput and delay analysis of network coded ALOHA in wireless networks,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, no. 277, pp. 1–15, 2012.
- [31] A. Laya, C. Kalalas, F. Vazquez-Gallego, L. Alonso and J. Alonso-Zarate, “Goodbye, ALOHA!,” *IEEE Access*, vol. 4, pp. 2029-2044, Jun. 2016.