

# 在 WiFi 與 ZigBee 共存網路中考量緊急訊息需求並提昇 Zigbee 傳輸機會之共存媒介傳輸協定

<sup>1</sup>Tse-Yuan Wang, <sup>1</sup>Shih-Shun Hsu, <sup>1</sup>Tzu-Lin Wang, <sup>2</sup>Chao-Tsun Chang, and  
<sup>1</sup>Chih-Yung Chang

<sup>1</sup>Tamkang University, Taiwan

<sup>2</sup>Hsiuping University of Science & Technology, Taiwan

tseyuan20@gmail.com, steven110221@gmail.com, tlwang@wireless.cs.tku.edu.tw,  
cctas@mail.hust.edu.tw, cychang@mail.tku.edu.tw

## 摘要

近年因為物聯網應用興起，異質網路的問題越來越受到重視，其中又以 WiFi 與 ZigBee 網路受到最多關注。然而在此共存網路環境中，ZigBee 網路處於傳輸弱勢難以傳送資料，將使緊急事件無法透過 ZigBee 裝置即時回傳至控制中心，進而耽誤救援行動。為解決上述問題，本論文提出一運行於 ZigBee 與 WiFi 網路之共存媒介傳輸協定。本傳輸協定除了能有效解決共存網路中的干擾問題外，亦針對緊急事件的發生做出應對，以加快緊急資料的傳遞速度。實驗模擬顯示本論文提出的共存協定可有效減少 ZigBee 與 WiFi 網路間的傳輸干擾行為，並有效降低 ZigBee 網路的傳輸延遲。

**關鍵詞：**共存網路、ZigBee、WiFi、點對點傳輸延遲、傳輸干擾。

## 1. 前言

近年來，物聯網的相關應用已逐漸受到關注。在物聯網相關技術中，WiFi[1]及 Zigbee[2]標準是兩種最常見的無線通訊技術。前者是市面上最為普及的無線網路傳輸技術，後者則因具有低功耗、低成本、支援大量網路節點等特色，故被廣泛應用於無線感測網路中。由於兩種網路皆運行於 2.4GHz 免費頻帶，且各自制定避免傳輸干擾的機制，但其主要目的僅是為了減少同質網路中的傳輸干擾行為。基於上述原因，在共存網路環境中，兩網路間的傳輸方式變得相當缺乏協調，進而造成共存網路之傳輸干擾問題。關於共存干擾問題，研究分析[3]指出當兩者網路共存時，ZigBee 網路在傳輸資料方面處於弱勢，因此，在共存環境下，若不解決 ZigBee 網路傳輸弱勢，將使得 ZigBee 網路中的資料無法順利傳送，例如監控老人活動、火災監控或血壓監控等物聯網應用場景，造成重大損失。

為解決 WiFi 與 ZigBee 網路間的共存干擾問題，學者們提出相關研究以緩解兩者間的傳輸衝突，其可分為三大類：第三方設備協調、頻道分隔及時間分隔。就『第三方設備協調』而言，其主要利用第三方設備間接提升 ZigBee 網路的能力。CBT-MAC[4]加入一個由 ZigBee 裝置擔任的信號發送者，藉由不斷發送忙碌信號以降低 WiFi 網路的干擾行為。但由於信號發送者難以預估 ZigBee 裝置需要的傳輸時間，將可能過度抑制 WiFi 的傳輸需

求。第二類研究為頻道分隔，研究[5]提出一能量感知演算法，使得 ZigBee 協調者感測頻道干擾值過高時，能自動把網路切換至另一干擾較少的頻道進行傳輸，藉此降低 WiFi 網路的影響。但當場景中網路數量過多時，將導致此類作法無法找到合適的頻道配置方式，使得共存干擾的問題依然存在。第三類作法為時間分隔，TT-MAC[6]利用將 ZigBee 與 WiFi 網路的傳輸時間錯開，使 ZigBee 不會受到 WiFi 的干擾。其概念為設置多個內含 WiFi 與 ZigBee 網卡之閘道器擔任多個 ZigBee 星狀網路的協調者，AP 在每次週期會輪詢一個閘道器，將部份傳輸時間分配給 ZigBee 網路使用，藉此降低共存傳輸干擾的問題。

雖然上述三類的作法可減少共存傳輸干擾的問題，然而，過往相關研究均未考慮物聯網應用中的緊急訊息傳輸需求。除了必須解決的 ZigBee 網路傳輸弱勢，還應加強 ZigBee 網路在 WiFi 網路干擾下快速傳送緊急訊息的能力，讓緊急事件能更即時地被得知。有鑑於此，本篇論文提出一運行於 ZigBee 與 WiFi 網路之共存媒介傳輸協定，利用時間切割的網路共存架構，切分 ZigBee 與 WiFi 網路的傳輸時段，並依據緊急訊息封包的傳輸需求，動態調整 ZigBee 網路的參數值。由實驗結果可知，本論文提出的 ZigBee 網路初始化與動態共存網路架構相較於先前相關研究，可有效減少 ZigBee 網路的傳輸弱勢，增加其平行傳輸機會，更降低緊急訊息傳輸至後端管理伺服器的延遲時間。

本論文章節架構如下，第二章描述網路場景及欲解決的問題，第三章節為本論文提出之作法，第四章節為模擬分析，最後一章為本論文總結。

## 2. 網路環境與問題描述

### 2.1 網路環境

假設場景中存在由一個 WiFi AP 和  $u$  個 WiFi 裝置組成的 WiFi 網路以及由  $n$  個 ZigBee 裝置  $Z$  組成的 ZigBee 網路，其中包含一個閘道器  $z_g$ 、 $n_r$  個正準備初始化的 ZigBee 路由器  $Z_r$  與  $n_d$  個 ZigBee 終端設備  $Z_d$ 。閘道器內含 WiFi 與 ZigBee 晶片，可協調 WiFi 和 ZigBee 間的通訊，並且負責擔任 ZigBee 網路中的協調者。本論文之網路環境假定 ZigBee 網路頻道均受到 WiFi 網路干擾，且所有 ZigBee 裝置皆在 WiFi AP 的傳輸範圍內。

## 2.2 問題描述

在物聯網環境中，功率強大的 WiFi 網路常對 ZigBee 網路造成嚴重的干擾。因此，本論文首先保證 ZigBee 網路成功傳送資料，其後解決如何讓 ZigBee 裝置快速將資料回傳至閘道器，並轉送至後端管理伺服器。本論文主要目標為在 WiFi 網路干擾下，最小化 ZigBee 網路中終端設備到協調者間的點對點延遲時間 (Maximum End-to-End Delay)。

在詳細說明本論文的目標前，需先了解 ZigBee 傳輸規範。協調者將時間軸切成連續且長度相同的時間區段稱為 Superframe，且由  $c$  個 Active windows 所組成。第一個 Active window 的起始時間點為第一個 Beacon 發送編號，其餘以此類推。協調者將使用第一個 Beacon 發送編號，使用第一個 Active window 與其子裝置傳輸，而網路內剩餘路由器亦隨機挑選一個 Beacon 發送編號與其子裝置傳輸資料。然而，當某一裝置欲透過多跳樹狀拓樸傳送資料至協調者時，可能因為各路由器使用的 Active window 分配不佳，導致傳輸時間延長。令以  $d_i$  表示 ZigBee 路由器裝置  $i$  接收資料後，在未受到 WiFi 干擾下，將資料轉送至上層裝置所需的傳輸延遲時間。其中，算法分為兩種 case，一類為裝置  $i$  之 Beacon 發送編號( $b_i$ )小於其上層裝置( $b_i^p$ )，此時只需考慮它們的時間差( $b_i^p - b_i$ )乘以 Active window 長度( $t^d$ )即可。反之，當裝置  $i$  之 Beacon 發送編號大於其上層裝置時，裝置  $i$  的資料傳輸被迫只能在下一次的 Superframe 進行，故其傳輸延遲需多加上一個 Superframe 的時間長度( $c*t^d$ )，如公式(1)所示。

$$d_i = \begin{cases} (b_i^p - b_i) * t^d & , \text{if } b_i^p > b_i \\ (b_i^p - b_i + c) * t^d & , \text{otherwise} \end{cases}, \forall i \in Z_r \quad (1)$$

令符號  $d_i^w$  表示 ZigBee 路由器裝置  $i$  接收資料後，在可能受到 WiFi 干擾的情況下，將資料轉送至上層裝置所需的傳輸延遲時間。由於每一次 WiFi 干擾均導致 ZigBee 資料傳輸延遲一個 Superframe 的時間，故算法表示為  $d_i$  加上受到 WiFi 干擾的次數( $k_i$ )乘以 Superframe 的時間長度( $c*t^d$ )，如公式(2)所示。

$$d_i^w = d_i + k_i * c * t^d, \forall i \in Z_r \quad (2)$$

而後便可推算每一個 ZigBee 終端設備到協調者的點對點傳輸延遲  $\delta_i$ ，如公式(3)所示。

$$\delta_i = \sum_{\forall j \in P_i} d_j^w, \forall i \in Z_d \quad (3)$$

利用公式(3)便能表達本論文目標，以下列出本論文之目標式與限制式，而後說明各公式的意義。

### Objective Function

$$\text{Minimize } \max_{i \in Z_d} \delta_i \quad (4)$$

### Subject to:

#### (1) Beacon Constraint

$$b_{i,j} + b_{i,h} = 0, \forall i \in Z_r, j \in N(i), h \in G(i), \text{ where}$$

$$b_{i,k} = \begin{cases} 1, & \text{if the beacon time point of host } i \\ & \text{is same as that of host } k \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

#### (2) Active Constraint

$$\sum_{f=1}^c a_i^f \leq 2, \forall i \in Z, \text{ where}$$

$$a_i^f = \begin{cases} 1, & \text{if } f = b_i \text{ or } f = b_i^p \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

本論文主要目標為最小化最長的 ZigBee 裝置延遲時間，如公式(4)所示。為了滿足公式(4)，ZigBee 裝置必需滿足限制式(5)、(6)。限制式(5)規定所有深度為  $dp_i$  的 ZigBee 路由器  $i$ ，選擇的 Beacon 發送時間不能與其任一鄰居裝置  $j$  和深度為  $dp_i - 2$  之上層裝置  $h$  相同( $b_{i,j} + b_{i,h} = 0$ )，其主要因是避免 ZigBee 裝置  $i$  與  $j$  同時發送 Beacon 產生碰撞，亦避免裝置  $i$  與裝置  $h$  同時進行資料傳輸，而對裝置  $i$  的上層裝置造成隱藏節點碰撞問題。限制式(6)說明任一 ZigBee 裝置  $i$  在一個 Superframe 中，只會在自己與父親的活動區間( $a_i^f = b_i$  or  $a_i^f = b_i^p$ )醒來，以便和自己的上層或下層裝置進行資料傳輸，否則將處於閒置狀態以節省電力的消耗。

## 3. WZC-MAC

本論文透過改善 ZigBee 網路初始化的規則，以增加 ZigBee 網路的並行傳輸機會，進而減少 ZigBee 終端裝置的點對點傳輸延遲時間。此外，本論文亦提出一 WiFi 與 ZigBee 異質網路共存的傳輸架構，避免 ZigBee 網路因受到 WiFi 網路干擾而增加其延遲時間。最後，本論文發展一 ZigBee 網路緊急訊息傳輸的機制，讓緊急訊息得以快速地回傳至閘道器。以下將會針對此三個部分詳細介紹。

### 3.1 ZigBee 網路初始化

由於 ZigBee 標準中對於各裝置選取 Beacon 發送時間的限制過於寬鬆，常造成 ZigBee 網路運行效率不佳。為此，本論文設計加入一 ZigBee 網路初始化限制，使得每個 ZigBee 路由器能選擇更好的 Beacon 發送時間，進而提升 ZigBee 網路的並行傳輸機會。為了計算 ZigBee 路由器  $i$  Beacon 發送時間  $b_i$ ，首先假設每個 Superframe 含有  $c$  個等長的 Active Window，並令  $T = \{t_1, \dots, t_c\}$  為一個 Superframe 中，每個 Active Window 的起始時間點，亦為依序發送 Beacon 的時間點。此外，令  $F_i = \{t_f \in T | t_f = b_j \text{ or } t_f = b_h\}$  代表裝置  $i$  不能選取的 Beacon 發送編號，亦為其鄰居裝置  $j$  和拓樸中之上上層裝置  $h$  選擇的 Beacon 發送編號，以避免 Secondary interference。當 ZigBee 路由器  $i$  選擇 Beacon 發送時間時，除了現有規定外，本論文亦增

加一項發送限制，即必須選擇時間點最早的合法 Beacon 發送時間編號，如公式(7)所示。

$$b_i = \text{Min}(T - F_i) \quad (7)$$

若場景中每個 ZigBee 路由器依照公式(7)選擇其 Beacon 發送時間，便可最大化 ZigBee 網路的並行傳輸機會。

如下圖 1 所示，協調者 A 將一段 Superframe 切成 8 個 Active window，而圖下方分別是由 ZigBee 規範以及本論文提出 WZC-MAC 協定所排之網路排程。排程上標注的各路由器代號表示路由器選擇的 Active window。由圖 1 可知，各路由器隨機選擇 Active window 將會導致多餘傳輸時間，除了增加 ZigBee 網路被 WiFi 網路干擾的機會外，還可能限制協調者調整 Superframe 的長度。相較於 ZigBee 規範，本論文提出的網路初始化排程能使各路由器的 Beacon 發送時間，在不曾干擾其他裝置的情況下，盡可能的被提前。除了讓 ZigBee 裝置間的並行傳輸機會大幅提升外，亦能將所有 Active windows 集中排列在 Superframe 的起始處，使得協調者能減少一個 Superframe 長度，藉此降低 ZigBee 網路中各裝置的傳輸延遲時間。

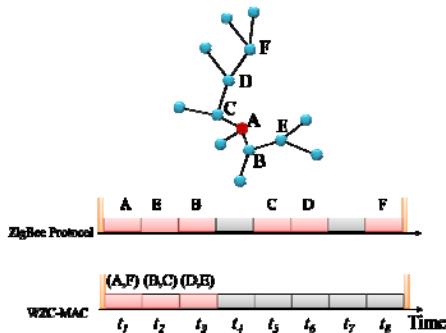


圖 1 兩相異 ZigBee 網路初始化結果

### 3.2 ZigBee 與 WiFi 異質網路共存之傳輸架構

本論文提出的 WZC-MAC 使用類似[6]之時間切割機制，以解決 ZigBee 與 WiFi 網路間的共存干擾問題。首先，WiFi AP 定期廣播 WiFi Beacon，並公告此次 WiFi 傳輸架構與 CFP 中欲服務的 WiFi 裝置，如下圖 2 所示。AP 發送 Beacon 後，即馬上輪詢(Polling)閘道器，閘道器接收到 AP 輪詢後，頻道使用權將完全歸屬於閘道器。接著閘道器會以 ZigBee 協調者的身份公告一個 ZigBee Beacon，表示 ZigBee 網路的傳輸時段開始。場景中的 ZigBee 路由器與終端裝置收到 ZigBee Beacon 後，便依照自己的醒睡排程開始傳送資料。最後 AP 會利用剩餘的 CFP 時間繼續輪詢其他 WiFi 裝置直到 CFP 結束。在後續 CP 時段中，閘道器將身份轉換成普通 WiFi 裝置與其他的 WiFi 裝置競爭傳輸機會，以便將 ZigBee 網路收集的緊急訊息上傳至 AP。利用上

述的方法，可成功將 ZigBee 與 WiFi 網路的傳輸時段分開，避免 WiFi 對 ZigBee 網路造成的傳輸干擾。

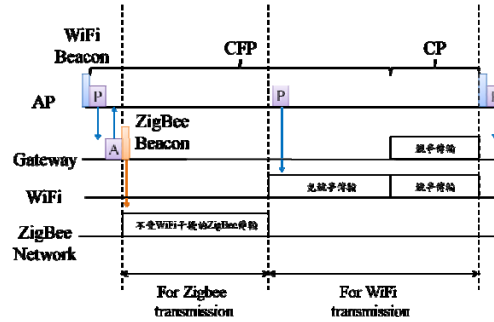


圖 2 ZigBee 與 WiFi 異質網路共存之傳輸架構

### 3.3 ZigBee 網路緊急訊息傳輸機制

為使 ZigBee 裝置將緊急事件快速傳送至閘道器中，本論文提出之 WZC-MAC 協定希望透過減少 Superframe 長度，來增加 Superframe 個數，以盡可能利用有限的 ZigBee 傳輸時間完成緊急封包傳送。但就無緊急事件發生時而言，若不斷使用較短的 Superframe，將使得 ZigBee 裝置因醒睡切換次數頻繁，造成龐大的電量消耗。

為了避免 ZigBee 裝置在沒有緊急事件發生時消耗電力，本論文提出之 WZC-MAC 協定可分為兩種運作模式，沒有緊急事件的一般狀態和事件發生後的緊急狀態中，分別稱為 ETM-N 和 ETM-E。在 ETM-N 機制中，若協調者收到一筆緊急訊息則表示緊急事件發生，協調者馬上切換運作 ETM-E 機制。在 ETM-N 機制下，為了使 ZigBee 裝置省電，協調者在每次 ZigBee 裝置傳輸時間中，只執行較少次短的 Superframe，讓場景中任一 ZigBee 設備均有能力將資料回傳至閘道器，而在剩餘的 ZigBee 傳輸時段則可提早進入休眠狀態，藉此節省更多電力。而在 ETM-E 的機制下，協調者會在 WiFi CFP 中盡可能地排程最多 Superframe，以最大化緊急訊息的收集速度。以下介紹如何最小化 Superframe 長度，接著說明 ETM-N 和 ETM-E 的詳細運作機制。

由於 802.15.4 標準限制 Superframe 的長度，因此在縮短 Superframe 長度時，應符合標準的規範。ZigBee Active window 與 Superframe 長度受到 IEEE 802.15.4 規範中之 MAC 層三個參數  $SO$ 、 $BO$  和  $aMinCAPLength$  限制，以下針對 WZC-MAC 之 ZigBee 排程進行討論。如圖 3 所示，假設一段 Superframe 需要  $n_a$  個 Active window 排列在時間起始處，而所有裝置在剩餘的 Superframe 時間內，均維持睡眠狀態以節省電力消耗。其中，一個 Superframe 的實際長度由參數  $BO$  表示，其長度為  $2^{BO} * aBaseSuperframeDuration$ ，而一個 Active window 的長度則由參數  $SO$  和  $aMinCAPLength$  表示，其實際長度為  $2^{SO} * aBaseSuperframeDuration$ 。因此，一個 Superframe 可被切分成  $2^{BO-SO}$  個 Active window。就限制而言，參數  $aMinCAPLength$  限制

一個 Active window 中，CAP 的最小時間長度。

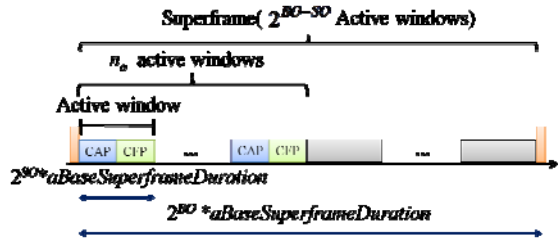


圖 3 WZC-MAC 之 Superframe 與 Active window 關係圖

由於 802.15.4 協定規範 Superframe 長度不得小於  $n_a$  個 Active window，否則將使部分路由器無法找到一個不會干擾其他 ZigBee 裝置的 Active window 與下層裝置傳輸資料，為此，WZC-MAC 首先最小化一個 Active window 以縮短  $n_a$  個 Active window 長度，最後推導一個最短的 Superframe 長度。

為保證緊急封包的傳輸需求，WZC-MAC 讓每個 ZigBee 終端裝置與其上層裝置申請一段 ZigBee CFP 的保證時槽 (Guaranteed Time Slot, GTS) 以傳輸緊急封包。為方便表示，假設每個 ZigBee 裝置每次都以傳輸速率  $r_z$  傳送一個大小為  $l$  的緊急封包。另外，令  $n_c$  表示 ZigBee 網路中最大的下層裝置數量。接著，WZC-MAC 將最小化 CAP 與 CFP 長度。其算法將一個 Active window 中的 CAP 時間長度表示為一段 Active window 的長度 ( $2^{SO} * aBaseSuperframeDuration$ ) 減去  $n_c$  個下層裝置在 CFP 中預約之 GTS 長度總和 ( $n_c * l / r_z$ )，在滿足限制式(8)的條件下找出最小的 CAP 時間長度。

$$2^{SO} * aBaseSuperframeDuration - (n_c * l / r_z) > aMinCAPLength \quad (8)$$

令  $SO_{min}$  表示一個滿足 CAP 時間長度限制之最小  $SO$  參數值，透過公式(8)可推算  $SO_{min}$  值，如公式(9)所示。

$$SO_{min} = \log_2 \left[ \frac{aMinCAPLength + (n_c * l / r_z)}{aBaseSuperframeDuration} \right] \quad (9)$$

接著根據  $SO_{min}$  值說明如何求出一個最短的 Superframe 長度。由於一個 Superframe 可被表示為  $2^{BO-SO_{min}}$  個 Active window，其長度不得小於  $n_a$  個 Active window，因此 Superframe 長度限制如公式(10)所示。

$$2^{BO-SO_{min}} \geq n_a \quad (10)$$

隨後，協調者利用已知的  $SO_{min}$  與  $n_a$ ，依照限制式(10)，推導一個滿足所有裝置傳輸需求之最小  $BO$  值。令  $BO_{min}$  表示最小  $BO$  參數，其值如公式(11)所示，最後得到一段最短的 Superframe。

$$BO_{min} = \lceil \log_2 n_a + SO_{min} \rceil \quad (11)$$

雖然協調者排程最短 Superframe 可提升緊急訊息的收集速度，但在無緊急事件發生時，卻容易

因 ZigBee 裝置醒睡切換次數頻繁，造成 ZigBee 網路過大的電量消耗。於是 ETM-N 考量 ZigBee 多跳樹狀拓撲的特性與整體網路電量消耗，假設所有 ZigBee 裝置都有能力在  $\xi + 1$  個 Superframe 時間內將一筆資料回傳至閘道器。ETM-N 的運作方式如下圖 4 所示，協調器於每個 WiFi CFP 中均執行  $\xi$  個最短的 Superframe，其長度由參數  $SO_{min}$  與  $BO_{min}$  決定。接著協調器會另外執行一個長時間的 Superframe，延長所有裝置的休眠時間直到下一次 WiFi CFP，藉此節省 ZigBee 裝置的電量，而此 Superframe 的長度則由參數  $SO_{min}$  和  $BO_i$  決定。如上所述，WZC-MAC 除了可在一般狀態中保持對緊急事件的警覺性，亦能節省不必要的電力消耗。為了完成這樣的機制，下面段落中將說明如何計算  $\xi$  的個數與  $BO_i$  長度。

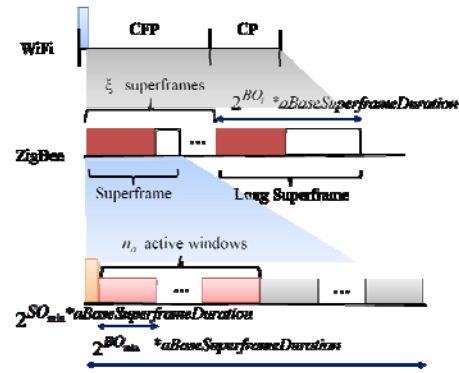


圖 4 ETM-N 運作機制

由於終端裝置在多跳環境中不一定可以直接與閘道器通訊，其感測資料常需透過路由器代傳至閘道器。令  $P_i$  表示終端裝置  $i$  到閘道器路徑上所有經過的路由器集合， $\sigma_j$  表示任一裝置  $j$  是否需要在下一個 Superframe 才能傳資料給上層裝置，若是則  $\sigma_j = 1$ 。  $P_i$  中任一路由器  $j$  所選的 Beacon 發送時間 ( $b_j$ ) 如果比其上層裝置的 Beacon 發送編號 ( $b_j^p$ ) 大，這表示當路由器  $j$  收到來自下層裝置的資料後，需要在下一個 Superframe 才能將資料轉傳到其上層裝置 ( $\sigma_j = 1$ )。因此，將終端裝置  $i$  之  $P_i$  內所有路由器轉傳資料需要的 Superframe 個數加總，便可算出終端裝置  $i$  將資料傳回至閘道器需要的 Superframe 個數  $c_i$ ，如公式(12)所示。

$$c_i = \left( \sum_{j \in P_i} \sigma_j \right) + 1, \forall i \in Z_d, \text{ where} \quad (12)$$

$$\sigma_j = \begin{cases} 1, & \text{if } b_j > b_j^p \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

而後，協調器便從所有終端裝置需要的 Superframe 個數中，選出最大值並減 1 作為協調器在每次 ZigBee 傳輸時段中擬先執行的最短 Superframe 個數  $\xi$ ，其值如公式(13)所示。

$$\xi = \text{Max}_{i \in Z_d} c_i - 1 \quad (13)$$



在 ETM-N 中，協調者只需在每次 WiFi CFP 裡連續執行  $\xi+1$  個 Superframe，即可保證當緊急事件發生時，協調者都能在一段 ZigBee 傳輸時間內察覺，進而快速做出應對。但為了要節省電力，ETM-N 讓協調者在連續執行  $\xi$  個 Superframe 後，轉而執行一個長的 Superframe，使 Zigbee 設備處於長睡眠狀態，直到下一次 WiFi CFP 的開始，以節省其電量耗能。這個長的 Superframe 可被表示為一個 WiFi Superframe( $t_s$ )減去  $\xi$  個最短的 Superframe 時間長度，其長度可以表示如公式(14)。接著，協調器便能夠依據公式(14)，算出一個期望的整數  $BO_I$  值，如公式(15)所示。

$$2^{BO_I} * aBaseSuperframeDuration = t_s - \xi * 2^{BO_{min}} * aBaseSuperframeDuration \quad (14)$$

$$BO_I = \left\lceil \log_2 \frac{t_s - \xi * 2^{BO_{min}} * aBaseSuperframeDuration}{aBaseSuperframeDuration} \right\rceil \quad (15)$$

協調者藉由  $BO_I$  參數值調整延長第  $\xi+1$  個執行的 Superframe 長度，將不需要使用的 WiFi CFP 時段使用權歸還，亦能減少各裝置的電量消耗。ZigBee 協調者在每個 WiFi Superframe 中將維持運行上述 ETM-N 機制，直至收到任一筆緊急封包後，協調者便會在下一個 Superframe 進入緊急情況。此時，為了要最大化緊急訊息收集的速度，協調者會在 WiFi CFP 中盡可能執行最多的短 Superframe，藉此降低緊急訊息抵達閘道器的時間延遲，如下圖 5 所示。此 ZigBee 傳輸排程方式將在緊急情況一直運行，直到協調者在連續  $\xi+1$  個最短 Superframe 期間內沒有收到任何一筆緊急封包後，就回到一般狀態以節省電量。

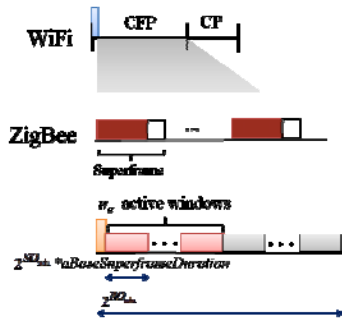


圖 5 ETM-E 運作機制

舉例而言，觀察 ETM-N 與 ETM-E 間的 Superframe 執行個數差異。假設協調者最多需要執行 4 個 Superframe 才能讓網路中所有裝置傳回一筆資料，而兩機制在一次 WiFi 週期的排程如下圖 6。在 ETM-N 中，協調者執行 3 個短的 Superframe 後，接著執行一個長的 Superframe，讓裝置進入省電模式到下一次 WiFi CFP，而在 ETM-E 中，協調者在 WiFi CFP 中盡可能排程最多個短的 Superframe，藉此最大化資料收集速度。由圖 6 可以很明顯發現，ETM-N 藉由執行較少次的 Superframe，能確實達到裝置省電以及加快緊急訊息收集的速度。

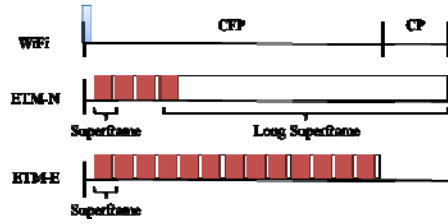


圖 6 ETM-N 與 ETM-E 之 Superframe 比較

WZC-MAC 緊急訊息傳輸機制能依據不同的場景狀況，動態改變 ZigBee 網路的傳輸需求，在保證緊急事件監控品質的同時，還盡可能減少 ZigBee 裝置的電量消耗，以延長網路生命時間。

#### 4. 模擬分析

本章節除了將 WZC-MAC 與過去研究中的 CBT-MAC[4]及 TT-MAC[6]進行模擬分析外，另外還考慮在我們的 WZC-MAC 中使用傳統 ZigBee 初始化的方式(WZC-MAC(without In.))與不運行 ETM-N 機制的方法(WZC-MAC(without ETM-N))一同加入比較。模擬場景大小為 200m\*200m，WiFi AP 佈置於場景中央，場景內所有 ZigBee 裝置皆有可能受到 WiFi 干擾。而其他 ZigBee 與 WiFi 相關參數則標示於表格 1 中[2][7][8]。

表格 1 ZigBee 與 WiFi 相關參數

ZigBee 傳輸速率	250kbps
ZigBee 緊急封包大小	30 bytes
ZigBee MinCAPLength	7.04 ms
ZigBee aBaseSuperframeDuration	15.36 ms
ZigBee Active 能源消耗	0.7 J/s
ZigBee Inactive 能源消耗	0.0007 J/s
ZigBee 傳輸半徑	10 m
ZigBee 可連接最大裝置個數	8
WiFi Superframe	491.52 ms
WiFi CFP	327.68 ms
WiFi 傳輸半徑	100 m

各模擬結果為每次模擬時間 50 秒並執行 100 次之獨立模擬結果的平均值，而在這 50 秒內包含 10~40 秒的緊急事件時間，且資料封包只會在此時段產生。

圖 7 觀察各作法中網路效能與 ZigBee 裝置個數間的關係。本實驗將緊急封包生成速率設定為 12/s，表示每個 ZigBee 裝置會在每秒緊急時間中感測 12 筆緊急資料。由於 WZC-MAC 改良網路初始化規則，除了讓 ZigBee 裝置擁有更多並行傳輸機會外，亦降低 Superframe 的時間長度，藉此讓 ZigBee 裝置可以在有限的時間內傳送更多的封包，因此能夠得到比較高的網路效能。而當 WZC-MAC 改用傳統 ZigBee 的初始化後，除了因並行傳輸機會減少外，還可能使 Superframe 的長度較長，使得 ZigBee 裝置在有限時間內能傳送的封包個數減少，導致網路效能將會明顯下降。對於 CBT-MAC 而言，因其

無法完全解決 WiFi 干擾的問題，使得其網路效能低落，但隨著 ZigBee 裝置個數增加，便可能會有更多裝置成功傳輸資料，導致網路效能持續上升。TT-MAC 由於一次只讓部份的 ZigBee 網路傳輸資料，故網路效能較不佳，且當 ZigBee 裝置個數增加後，對於網路效能影響有限。

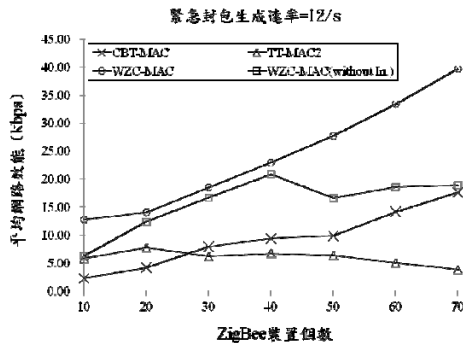


圖 7 網路效能與 ZigBee 裝置個數比較

圖 8 顯示網路效能與緊急封包生成速率間的關係，此實驗將 ZigBee 裝置個數設定為 50 個。WZC-MAC、WZC-MAC(without In.)與 CBT-MAC 的網路效能均隨著封包增加而變多，但因實驗時間與裝置個數有限，其效能分別在緊急封包生成速率增加的過程中達到網路的瓶頸，使網路效能不再持續上升。其中，因為 WZC-MAC 使用了較佳的網路初始辦法，使得能夠傳送的封包數量增加，於是網路效能也較高。就 TT-MAC 而言，由於一次只能提供一個 ZigBee 星狀網路傳輸資料，就算各裝置的資料量變多也不一定有能力將資料回傳至閘道器，故其網路效能會維持不變。

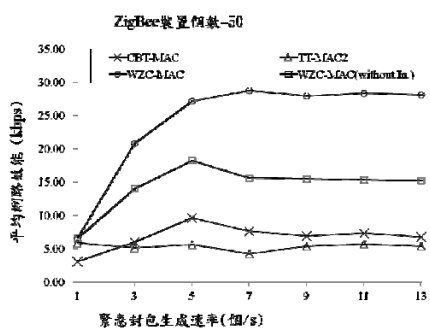


圖 8 網路效能與緊急封包生成速率比較

圖 9 針對 WZC-MAC 評估一般情況下的緊急訊息傳輸機制能降低多少電量消耗。此實驗將 ZigBee 裝置個數設定為 10，緊急封包生成速率為 12/s。觀察下圖 9 可以發現，由於 ETM-N 機制使用一段長的 Superframe 讓 ZigBee 裝置有較多的休眠時間，使得電量的耗損較小。而隨著緊急事件時間長度增加，運行 ETM-N 機制的時間也會越來越短，故其平均電量耗損會與只使用 ETM-E 機制的耗電量逐漸趨於相同。

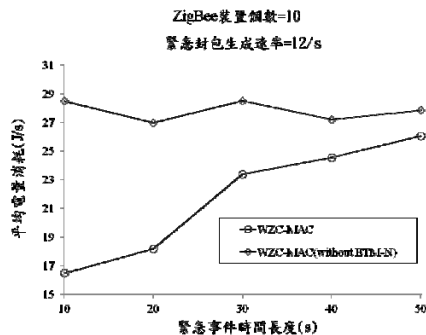


圖 9 網路耗電量與緊急事件時間長度比較

## 5. 結論

本論文提出之 WZC-MAC 除了有效解決 WiFi 與 ZigBee 網路間的傳輸干擾外，亦結合一 ZigBee 網路緊急訊息傳輸機制，使得不定期發生的緊急事件能被感測器快速回報至後端管理伺服器。另 WZC-MAC 考慮 ZigBee 網路的電量消耗，將場景分成一般狀態及緊急狀態，並根據不同場景狀態動態調整 ZigBee 網路的 Superframe 排程方式，以延長 ZigBee 網路的網路生命週期。實驗模擬顯示本論文提出的 WZC-MAC 可有效減少 ZigBee 與 WiFi 網路間的傳輸干擾，並降低 ZigBee 網路的點對點傳輸延遲，而動態緊急訊息傳輸機制亦確實能有效降低 ZigBee 裝置的耗電量。

## 致謝

本論文作者感謝國科會計畫補助，計畫編號為 <NSC 100-2221-E-032-015-MY3> 以及 <NSC 100-2632-E-032-001-MY3>。

## 參考文獻

- [1] IEEE Std 802.11b-1999, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: High Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band, 1999.
- [2] IEEE 802.15.4 Specification, Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) Oct. 2003.
- [3] Guang Yang and Yu Yu, "ZigBee Networks Performance under WLAN 802.11b/g Interference," *Wireless Pervasive Computing, (ISWPC)*, 2009.
- [4] Kang G. Shin and Xinyu Zhang, "Cooperative Carrier Signaling: Harmonizing Coexisting WPAN and WLAN Devices," *IEEE/ACM Transactions On Networking*, vol. 21, no. 2, pp. 426-439, Apr. 2012.
- [5] G.M.Tamilselvan and Dr.A.Shanmugam, "Cluster Reformation and Scheduling for Interference Mitigation in Coexistence Heterogeneous Wireless Packet Networks," *Global Journal of Computer Science and Technology*, vol. 10, no. 13, 2010.
- [6] Haleh Khojasteh, Jelena Mi'si'c and Vojislav B. Mi'si'c, "A Two-Tier Integrated RFID/Sensor Network with a WiFi WLAN," *IEEE IWCMC*, 2012.
- [7] J. Hill and D. Culler "A Wireless Embedded Sensor Architecture for System-Level Optimization," *Technical report*, U.C., Berkeley, 2002.
- [8] S. Ganeriwal, A. Kansal, and M. B. Srivastava, "Self aware actuation for fault repair in sensor networks," *IEEE ICRA*, Apr. 2004.