在車載環境下建置低功耗藍芽模組之汽車胎壓偵測系統

***洪國鈞[1]、鐘國家[2]**

[1*]南臺科技大學資訊工程系、[2]國立高雄應用科技大學電子工程系

*grojium@stust.edu.tw

摘要

汽車胎壓偵測系統(TPMS)能在輪胎發生胎壓或胎溫異常時，主動並即時經由無線射頻(RF)系統警示輪胎發生異狀。由於現今的傳統式汽車胎壓偵測系統，大多數是以低於 1GHz 的 Sub-GHz 無線射頻頻段，來傳送數據與接收主機通訊，雖然在通訊的格式裡有循環冗餘檢查碼(CRC)的確認機制，也同時使用防止誤判的曼徹斯特編碼，但並沒有導入無線跳頻展頻技術(FHSS)與資料加密機制，有時會因為同頻段干擾而導致接收主機誤判。本論文基於抗無線射頻雜訊與裝置節能省電之功能訴求，研究以低功耗藍芽 4.0 版本(BLE4.0)，取代傳統式 TPMS 的無線射頻通訊。使用了 128 位元的進階加密標準機制(AES)，改善傳統式 TPMS 誤報的問題，運用低功耗藍芽 4.0 的省電特性，達到 TPMS 監測模組的低功耗需求。又基於未來物聯網(IoT)裝置的大量使用及電源節能概念，則能透過 BLE4.0 結合相關車載裝置與網際網路功能，提供智慧化車載識別與管理應用。

關鍵詞：汽車胎壓偵測系統、無線跳頻展頻技術、低功耗藍芽 4.0 版本

Forming Low Power Consumption Bluetooth Module for Tire Pressure Monitoring System in Vehicle Environments

Gwo Jiun Horng[1*], Gwo Jia Jong[2]

[1*]Department of Computer Science and Information Engineering, Southern Taiwan University of Science and Technology

[2]Department of Electronic Engineering, National Kaohsiung University of Application Science

Abstract

Tire pressure monitoring system (TPMS) can immediately warn drivers of tire pressure or temperature problem. The driver can immediately know of a tire abnormality through a wireless radio frequency (RF) system. Most traditional TPMS systems use a Sub-GHz wireless spectrum under 1GHz radio frequency to transmit data. Although there are already cyclic redundancy checks (CRC) and Manchester Encoding configurations in communication formats, these systems do not include frequency-hopping spread spectrum (FHSS) or data encryption due to co-channel frequency interference. Using radio frequency noise reduction and power saving, we used a bluetooth low energy 4.0 system and BLE4.0 to replace traditional TPMS RF communication. We also adopted 128-bit advanced encryption standard (AES) mechanism to reduce problems with the TPMS system. The low-power features of BLE4.0 reduced power demand significantly. Using the Internet of things (IoT) and power saving ideas, this module can be integrated into vehicle devices through the Internet via BLE4.0 to provide intelligent vehicle identification and management applications in the future.

Received: April 8, 2016; first revised: May. 30, 2017; accepted: Oct, 2017.
Corresponding author: G.-J. Horng, Department of Computer Science and Information Engineering, Southern Taiwan University of Science and Technology, Tainan, Taiwan.

Keywords: Tire Pressure Monitoring System (TPMS), Cyclic Redundancy Check (CRC), Frequency-hopping Spread Spectrum (FHSS), Bluetooth Low Energy (BLE) 4.0, Advanced Encryption Standard (AES)

壹、前言

本文所採用的汽車胎壓偵測器(TPMS)[1]是屬於直接式胎內 TPMS，直接式指利用壓力感測器[2]直接在輪胎內感測胎壓，使用溫度感測器感測輪胎內的溫度[3]，並將壓力溫度監測模組與無線射頻通訊模組[4]安裝在輪胎內，由壓力溫度監測模組將感測到的壓力[5]、溫度[6]與電池電量[7]透過射頻無線通訊模組傳送到安裝在車內的中央顯示裝置，駕駛者可參考隨時螢幕上的壓力與溫度數據，若輪胎發生異常，由中央顯示裝置可提醒駕駛者[8]。

藍芽技術聯盟(bluetooth special interest group, SIG)[9]於 2010 年全面採用藍芽核心規格 4.0 的規範，其中包含了低耗能的 BLE4.0[10]，使藍芽通訊技術能使用在低容量電池的低耗能應用產品上，同時擁有藍芽的無線跳頻展頻技術與 AES-128 加密機制[11]，增加通訊時的抗干擾能力與資料交握的正確性，並由於藍芽技術工作在全球通用的 2.4GHz ISM (工業、科學、醫學) 頻段(industrial scientific medical band, ISM)[12]，泛指世界各國將某特定無線頻段提供給工業、科學、醫學機構使用，不受各國無線射頻法規限制[10]，在產品行銷上更為容易[13-14]。我們以此 BLE4.0 作為本研究之無線通訊核心，使用德州儀器 TI CC2541 晶片，設計適合 TPMS 應用韌體，以 IIC (I^2C) 通訊匯流排讀取各項感測元件偵測值，運用 BLE4.0 的加密技術與無線跳頻展頻通訊技術，將各項輪胎訊息傳送到車內顯示器，顯示器以 iOS 作業系統之行動裝置結合應用軟體之 APP 設計，APP 使用 iOS 提供的 BLE4.0 應用程式撰寫介面，使 APP 能完全相容在 iOS 裝置。

全球車輛需求日益增多，隨著駕駛者對車輛之舒適性、娛樂性、操控性與安全性要求與重視，使車輛的配備需求量更是隨之龐大，然而車輛安全性問題才是駕駛者最重視的。各種品牌的車輛不論在引擎室、底盤、車體上與車內都安裝許多感知器來偵測車輛狀況，進而提升行車安全，諸多感知器模組、控制模組、引擎控制單元(engine control unit)、電子控制單元(electronic control unit, ECU)皆利用實體線、LIN Bus(local interconnect protocol bus)或 CAN Bus(controller area network bus)與車身控制模組 BCM(body control module)相互連結，偵測結果呈現在車用儀表上提示駕駛，以達到行車安全目的。

在輪胎部分[15]，常因駕駛者忽略出門前須檢查輪胎胎壓，或胎紋深度習慣[16]，行駛中發生爆胎意外，導致交通事故發生。然而，出門前使用胎壓計可測量胎壓，行駛中的胎壓狀態，駕駛者則無法得知，而胎紋深度與輪胎龜裂更較不易檢查出是否安全。若能安裝 TPMS 隨時監測胎壓與胎溫[17]，可檢查輪胎是否足夠的胎壓，除了讓駕駛能隨時監測輪胎狀況，異常時立即採取因應措施提升行車安全外，不因胎壓異常增加輪胎摩擦，而減少輪胎壽命[18]，進而傷害車輛底盤與懸吊系統，保持正確的胎壓可以降低油耗。

胎壓過高造成胎面中間凸出[19]，而無法與地面完全接觸，對汽車引擎負荷雖然較輕，卻會因為輪胎本身負荷過高，而有爆胎的危險，也會造成車輛行駛時穩定性低，過硬的輪胎使乘坐舒適性不佳、避震效果差。汽車操控性受影響，胎面中間會形成胎紋較淺的“不平均磨損”狀態，如圖 1。

輪胎胎壓不足過低會造成車輛行進阻力變大，對於引擎產生負荷，因此耗油。與地面接觸面積變大後，輪胎的耐久性和胎紋壽命變差[20]，如圖 2。輪胎滾動時，胎壁因大幅撓曲變形使內部溫度易升高[21]，在承受比較大的負荷時就產生爆胎情形，高速行駛時，更有爆胎的危機[22]。

圖 1 胎壓過高胎面中央磨耗圖
(參考來源：ARTC 車輛研究測試中心
https://www.artc.org.tw/upfiles/EditUpload/
image/epaper/ecHo/9811/8.files/image013.jpg)

圖 2 胎壓不足胎肩部兩側磨耗圖
(參考來源：ARTC 車輛研究測試中心
https://www.artc.org.tw/upfiles/EditUpload/
image/epaper/ecHo/9811/8.files/image015.jpg)

另外，汽車行駛時，輪胎內部溫度會因內部氣體分子相互碰撞運動，加上胎面與路面摩擦，導致輪胎內部溫度升高，根據理想氣體方程式(ideal gas law)如公式 1，得知壓力 P 與溫度 T 成正比關係，因此當胎內溫度過高會造成胎壓過高的情況，所以汽車胎壓偵測系統必須監測輪胎內部溫度，以防止因溫度升高，而產生胎壓過高導致行駛中爆胎。

$$PV = nRT \tag{1}$$

公式中，P 是絕對壓力(kPa)；V 是輪胎內部體積(m^3)，可視為常數；n 是氣體分子數目(kmole)，可視為常數；R 是氣體常數，可視為常數；T 是絕對溫度(K)。本論文研究目的以 TI CC2541 處理器為設計主要核心，整合感測器與 BLE4.0，運用 iOS APP 實現 TPMS 應用，以 BLE4.0 設計的短距離通訊，提升輪胎資訊可靠度，結合 iOS 行動裝置，省下汽車內部配線安裝，由於 iOS 行動裝置普及與方便，增添了擁有 BLE4.0 的 TPMS 許多新穎性與未來性。

貳、相關文獻

一、藍芽 BLE4.0 簡介

藍芽技術聯盟 SIG 在 2010 年 7 月發佈了藍芽 4.0 版本的核心技術規範，藍芽 BT4.0 版本涵蓋了傳統藍芽、高速藍芽與低功耗藍芽技術，並以低功耗技術(low energy)為核心，是 BLE4.0。此技術最大特點是擁有低操作功耗與低待機功耗，適合在低傳輸量的無線網路應用裝置。

BLE4.0 的網路拓撲結構分成，星型拓撲網路與廣播拓撲。根據應用領域的不同 BLE4.0 會有不同的拓撲結構，而網路節點配置也不同，藍芽網路節點類型可分成主機(master)與從機(slave)，也可稱為服務器與客戶端，具體配置需要依配置文件決定。廣播裝置發送廣播訊息，掃瞄裝置未連接前會處於掃瞄狀態，當掃瞄到有廣播訊息並回應廣播裝置提出連接請求，廣播裝置接受連接請求，那廣播裝置與掃瞄裝置就會進入連接狀態。發起連接的裝置就是主機(掃瞄裝置)，接受連接請求的就是從機(廣播裝置)。

BLE4.0 工作在 2.4GHz 的全球通用 ISM 頻段，以高斯頻率偏移調變 (gaussian frequency shift keying, GFSK)，從 2.402GHz~2.480GHz 以每 2MHz 為一個通道的頻率間隔，共有 40 個通道，用 3 個固定的通道作為廣播功能，其餘 37 個作為動態資料跳頻通道。並使用在跳頻的過程中會自動避開被干擾的跳頻頻點的自適應跳頻技術，以最小的發射功率與最低的被干擾率，達到長時間使用的通訊品質。

二、加密演算法 AES-128

AES algorithm(advanced encryption standard)為對稱式演算法，指資料加密與解密是以同一組密鑰處理，資料長度為 128bits，128bits 資料是以 4*4 二維陣列方式排列，以 state array 為單位運算，圖 3 為 AES 運算單位 state，每一個 state 為 8bits，而密鑰分成 128bits、192bits、256bits 來進行加解密，藍芽系統加解密的密鑰就是以 128bits 演算。

$S_{0,0}$	$S_{0,1}$	$S_{0,2}$	$S_{0,3}$
$S_{1,0}$	$S_{1,1}$	$S_{1,2}$	$S_{1,3}$
$S_{2,0}$	$S_{2,1}$	$S_{2,2}$	$S_{2,3}$
$S_{3,0}$	$S_{3,1}$	$S_{3,2}$	$S_{3,3}$

圖 3 AES 運算單位 state array

(參考來源：AES Design Space Exploration with an IP Generator, http://images.cnitblog.com/blog2015/671127/201503/130047023709062.png)

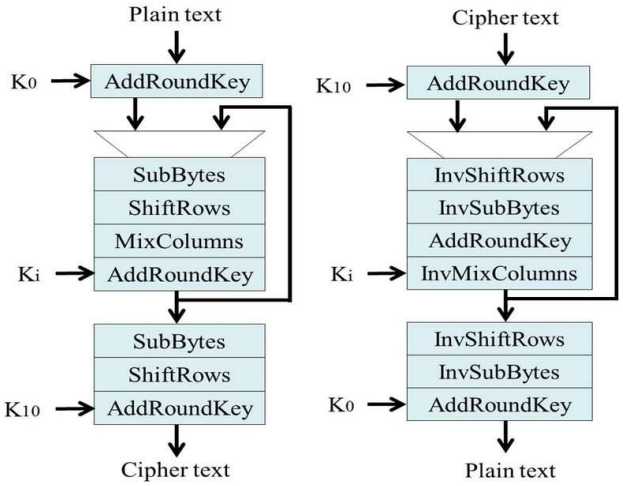

圖 4 (a)AES 加密演算方塊圖 (b)AES 解密演算方塊圖

AES 演算法加解密包含 4 種函數，AddRoundKey、SubBytes/ InvSubBytes、ShiftRows/ InvShiftRows 以及 MixColumns/ InvMixColumns，當 AES-128 演算開始，輸入的資料會被存為 state 格式，圖 4(a)為加密部分流程，圖 4(b)為解密部分流程。

AES 的具有下列四種基礎函數：(1) AddRoundKey，將元素以行為單位，利用 KeyExpasion 運算模組產生子密鑰作 XOR 運算；(2) SubBytes，此函數為替代性運算，以一個 byte 為單位，將 state 矩陣中的字節元素利用 substitution table(S-box)找出新的字節；(3) ShiftRows，此函數為置換性運算，以一列元素為單位進行運算，除 state 矩陣中的第一行資料不處理外，第二、三、四列資料分別左旋轉一個、兩個、三個位元。MixColumns，此函數為代替性運算，以一行元素為單位進行運算，利用 GF(28)特珠的加法與乘法得到 0x00 至 0xff 的數值。

三、TPMS 架構

汽車胎壓偵測器(TPMS)依量測方式分成間接式與直接式。間接式的 WSB TPMS (wheel-speed based TPMS)不使用壓力感應器測量胎壓，而是使用 ABS 煞車系統(anti-lock brake system)來測量胎壓，運用四輪胎壓不對稱會產生輪胎轉速不同的基本原理，來判斷胎壓是否異常。而直接式 TPMS 是整合了壓力、溫度、電壓與加速度感應器，直接偵測輪胎內的胎壓胎溫，依照結構設計，可分胎內與胎外，由於輪胎一直轉動必須使用無線通訊技術與電池，所以，監測模組的電池壽命長短[23]、通訊穩定度[24]、體積重量與機構安裝是直接式 TPMS 產品成敗的關鍵[26]。以 TI 的 CC2541 低功耗藍芽 4.0 版本結合壓力、溫度感測元件(freescale MPL115A2)與加速感應晶片(ADI ADXL345)建置 TPMS 系統用以取代傳統式 TPMS 使用的 RF 無線射頻與 LF 短距離低頻通訊，增加無線雙向傳輸 的穩定性與方便性。同時使用了 128 位元的進階加密標準機制以改善傳統式 TPMS 誤報的問題。

間接式 TPMS 多數是汽車原廠(original equipment, OE)於出廠前已安裝，是利用 ABS 的速度感測器來進行量測，速度感測器將量測到的數據傳送至 ABS 電子控制單元(ECU)、電子穩定系統(electronic stability control, ESC)與 TPMS ECU，TPMS ECU 運算後將狀態數據顯示於儀表板，圖 5 為示意圖。

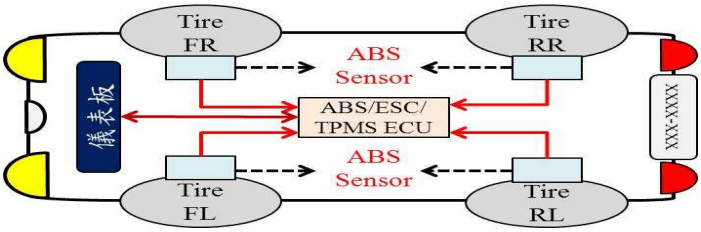

圖5 間接式TPMS示意圖

ABS 的速度感測器是利用霍爾元件(Hall)感應輪軸上的磁極，霍爾電路經過磁極的變化，會輸出電壓脈衝，圖 6 為示意圖，經過計算就能得到該輪胎的轉速(revolutions per minute, RPM)，利用式(2)可計算出角速度。

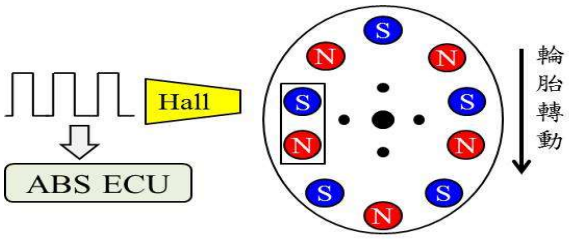

圖6 ABS Hall監測速度系統示意圖示

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} (\text{rad/sec}) \tag{2}$$

公式中，ω 為角速度；N 為轉速。

根據式(2)計算速度，若車輛前進速度 v 固定，當胎壓異常會改變輪胎圓心對地面的距離 r，則輪胎角速度 ω 不同，根據式(2)，則轉速 N 不同。

$$v = r\omega \tag{3}$$

公式中，v 為輪胎前進速度；r 為輪胎圓心對地面的距離；ω 為角速度。

$$C = \left| \frac{(\text{FL} + \text{RR}) - (\text{FR} + \text{RL})}{\text{平均時速}} \right| \tag{4}$$

公式中，*FL* 為左前方輪胎轉速；*RR* 為右後方輪胎轉速；*FR* 為右前方輪胎轉速；*RL* 為左後方輪胎轉速。

運用式(4)，以一個輪胎轉速為參考值來比較其他三個輪胎，判斷胎壓是否正常。假設以平均時速 50mph，正常胎壓時轉速 600rpm，異常胎壓時轉速 605rpm，由表 1 得知，當胎壓異常的輪胎出現在車輛的同側與同軸，或四個輪胎胎壓都是異常，就有可能無法判斷，若被參考的輪胎是異常的，也容易發生誤判的情況。

直接式 TPMS 的組成分成胎壓監測模組與車內中央顯示器，圖 7 為示意圖。胎壓監測模組使用壓力感測元件直接量測胎壓，其量測方式有利用電容式(capacitive)、表面聲波(surface acoustic wave, SAW)、電阻式，目前多數的胎壓感測元件多數以電阻式量測，並使用溫度感測元件測量胎溫。胎內式 TPMS 與胎外式 TPMS，兩者設計理念是一致的，皆是使用壓力溫度感測器直接與輪胎空氣接觸，將感測的數據由微處理器 MCU 計算處理，MCU 再透過無線射頻傳送胎壓胎溫等數據到車內中央顯示器，由顯示器判斷做出必要的警示。

表1 ABS ECU分析胎壓狀況表

狀態	判斷值 C	結果
單輪胎壓異常	$\left\|\frac{[(600+605)-(600+600)]}{50}\right\| = 0.1$	可正常警告
雙輪胎壓異常(同側)	$\left\|\frac{[(600+605)-(605+600)]}{50}\right\| = 0.0$	**無法警告**
雙輪胎壓異常(同軸)	$\left\|\frac{[(605+600)-(605+600)]}{50}\right\| = 0.0$	**無法警告**
雙輪胎壓異常(對角線)	$\left\|\frac{[(600+600)-(605+605)]}{50}\right\| = 0.2$	可正常警告
三輪胎壓異常	$\left\|\frac{[(605+605)-(605+600)]}{50}\right\| = 0.1$	可正常警告
四輪胎壓異常	$\left\|\frac{[(605+605)-(605+605)]}{50}\right\| = 0.0$	**無法警告**

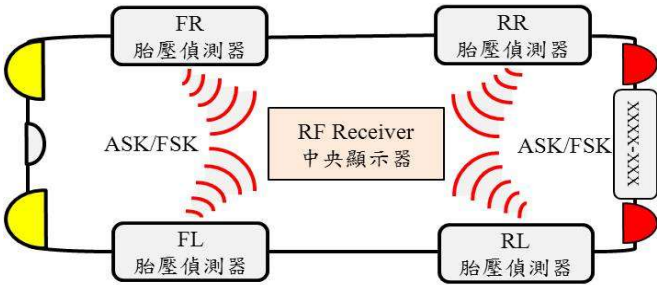

圖7 直接式TPMS組成示意圖

直接式量測必須將感測模組安裝在車胎內，由於汽車行駛時輪胎內環境非常的惡劣，胎壓、胎溫或濕度變化都非常大，所以，監測模組使用到的壓力感測器與溫度感測器、加速度感應器(G-sensor)、數位訊號處理單元(MCU)、無線傳輸模組和電源偵測的晶片系統模組等，都必須使用較高規格的元件，又為了維持輪胎行駛的穩定度，必須注意胎壓監測模組的重量，所有電子元件會以小型化設計為主，使用的電池需配合 MCU 設計的省電機制，以達到 5 年以上的 TPMS 使用壽命，所以，運用微機電系統(micro electro-mechanical systems, MEMS)技術來設計與生產，主要的壓力感測方式有矽整合電容器式壓力感測器及矽電阻式壓力感測器。

參、系統架構

本論文的研究基礎採用 TI 的 CC2541 解決方案，以 BLE4.0 協議棧為無線通訊核心，CC2451 是 SoC 晶片整合 8051 MCU 與無線射頻 2.4GHz 的 transceiver，內含 IIC 通訊匯流排，選用擁有 IIC 介面的感測 IC，利用 IIC address 定址方式直接與感測元件溝通，不會造成資料讀取上的問題，並利用 I/O PORT 做電源控制。CC2541 結合壓力、溫度感測元件(freescale MPL115A2)與加速感應晶片(ADI ADXL345)其整體結構圖，如圖 8。BLE4.0 取代傳統 TPMS 使用的 RF 無線射頻與 LF 短距離低頻通訊，增加無線雙向傳輸的穩定性與方便性。

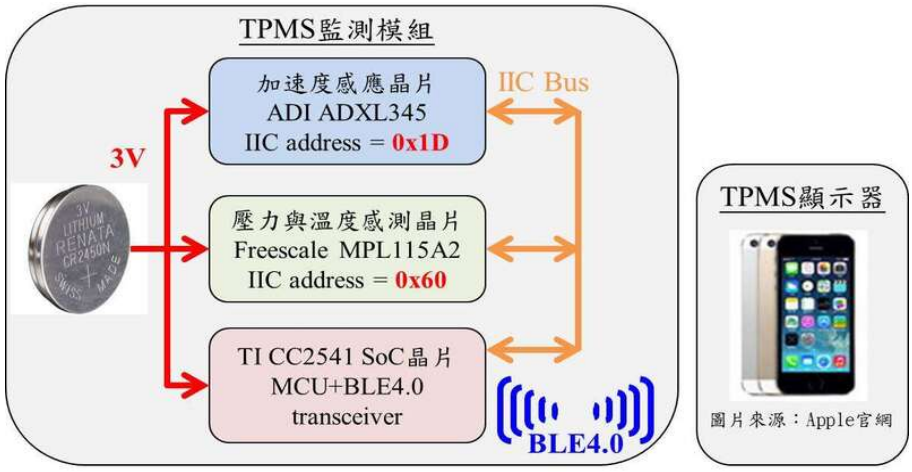

圖 8 BLE4.0 TPMS 系統結構圖

ADXL345 是一款小而薄的超低功耗三軸加速度感測器(accelerometer)(稱重力感測器 gravity sensor, G-sensor)， ADXL345 可測量動態裝置的重力加速度、移動與震動狀態，偵測解析度可設置成 10bits 與 13bits，運用 13bits 解析時，每一個 LSB 代表 3.9mg，測量範圍為±16 g。由式(5)表示 *g* 值代表重力加速度，*m* 是公尺，*s* 是秒，即表示每秒速度增加 9.8 公尺。根據牛頓第二運動定律(又稱加速度定律)，加速度是速度向量對時間的變化量，式(6)以數學微分方式來表示加速度、速度與時間的關係。

$$1g = 9.8m/s^2 \tag{5}$$

$$a(t) = \frac{dv(t)}{dt} \tag{6}$$

公式中， $a(t)$ 為加速度； $v(t)$ 為速度。

積分是微分的逆運算，可將速度 *v*(*t*) 表示為式(7)，將 *v*(*t*0)初速度設為 0，得式(8)，可計算出速度與加速度的關係。

$$v(t) = \int_{t0}^{t} a(t)dt + v(t0) \tag{7}$$

$$v(t) = \int_{t0}^{t} a(t)dt \tag{8}$$

公式中， $v(t0)$ 為初速度。

MCU 可以透過串列通訊來設定 ADXL345 的內部判斷值，當 g 值與判斷值比較後，可設置將結果輸出在兩個外部輸出腳位，此設計可利用來喚醒睡眠中的 MCU 或其他裝置，以減少電池消耗。ADXL345 有嵌入式存儲器管理系統採用 32 級先入先出(first in first out，FIFO)，可用於減少 MCU 處理器的負擔，降低整體功耗。ADXL345 的輸出數據格式是 16bits 的二補數值，外部 MCU 處理器可透過串列通訊介面讀取偵測值或設定 ADXL345。

MPL115A2 採用了微機電系統(MEMS)的壓力感測器並結合溫度偵測器，利用內部 ADC 的轉換，設計者只需要透過 IIC 通訊介面(圖 9)就能讀出壓力與溫度值，設計應用上十分簡單，IIC 設定的 Address 為 0x60，且微型的 LGA 封裝非常適合有空間要求的低功耗電子設備。

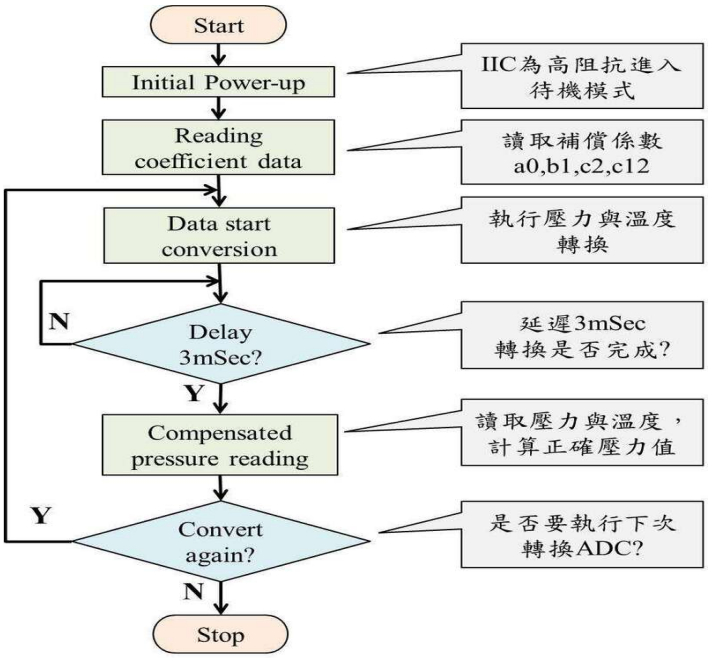

圖 9　MPL115A2 軟體流程圖

肆、實作分析與討論

我們將說明與分析以 BLE4.0 為核心的 TPMS，實驗是否能以 BLE4.0 實現多對一與一對多的無線網路系統，能讓 TPMS 中央顯示器正確地接收到四個胎壓胎溫監測模組所送出的資料訊息。本研究的中央顯示器以 APP 設計，APP 安裝在 iPhone5 裝置上，探討是否能以 APP 來實現 TPMS 顯示器的各項功能，並分析胎壓胎溫監測模組的電流消耗，本研究不做胎壓胎溫的準確度分析，主要以通訊 BLE4.0 為主。

由於現在汽車售後市場的直接式 TPMS，多數是使用類似 SP37 的整合型晶片，可縮小機板體積，減少監測模組重量，重量是輪胎運轉時，是否能平衡的關鍵因素，若太重未來安裝時，則不易輪胎定位。本研究是利用 BLE4.0 模組結合感測元件，圖 10 為整合硬體結構，利用圖 11 原 TPMS 監測模組的外觀圖，重新 layout 設計成圖 12，確定此硬體結構於實體應用是可行的。

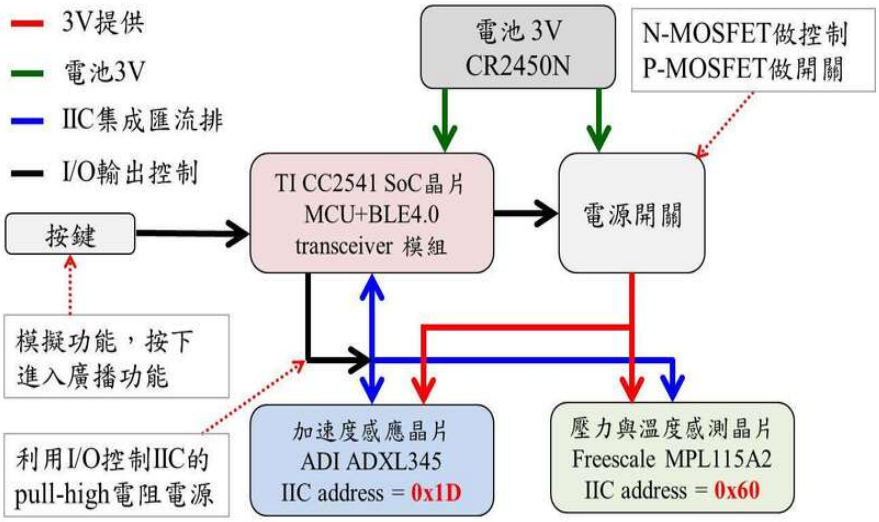

圖 10　TPMS 監測模組硬體結構

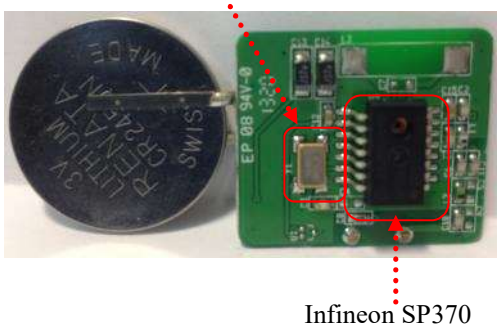

圖 11 原 TPMS 監測模組外觀圖

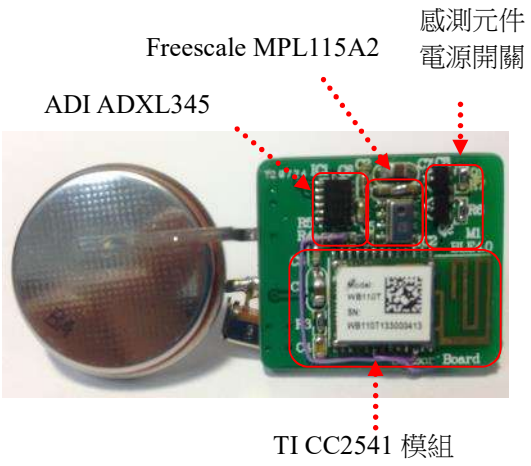

圖 12 TPMS 監測模組實體圖

TPMS 監測模組軟體使用 TI CC2541 KeyFob 應用套件設計，此套件運行 OSAL，以子系統作為 OSAL 任務，每一個任務都擁有初始設定及事件(Event)操作，一個 OSAL 任務最多定義 15 個事件，每一個事件可設定為立即或定時觸發，本研究的資料傳送是以定時事件觸發方式，監測模組則以通知(notify)方式，不用 APP 讀取詢問方式設計，此通知方式是傳統以 ASK/FSK 設計 TPMS 監測模組的設計概念。

設計的軟體主要在套件的 keyfobdemo.c, proxreporter.c, battservice.c 檔案，圖 13 為軟體初始化流程圖，當軟體執行到 OSAL 系統會一直依照 OSAL 任務的指派來執行軟體程序，圖 14 為 OSAL 任務事件流程圖，一開始執行時也必須將各個事件初始化，並寫入所設定的參數值與要使用到的 Service，本研究使用的 Service 說明包括(1) Proximity Reporter Profile：利用此 profile 讓監測模組進入 power save；(2) Accelerometer Profile：利用此 profile 將裝置資料以主動 notify 方式傳到 APP 端，本研究以每一秒傳送 1 個 byte 的資料(胎壓、胎溫、電池電量)。

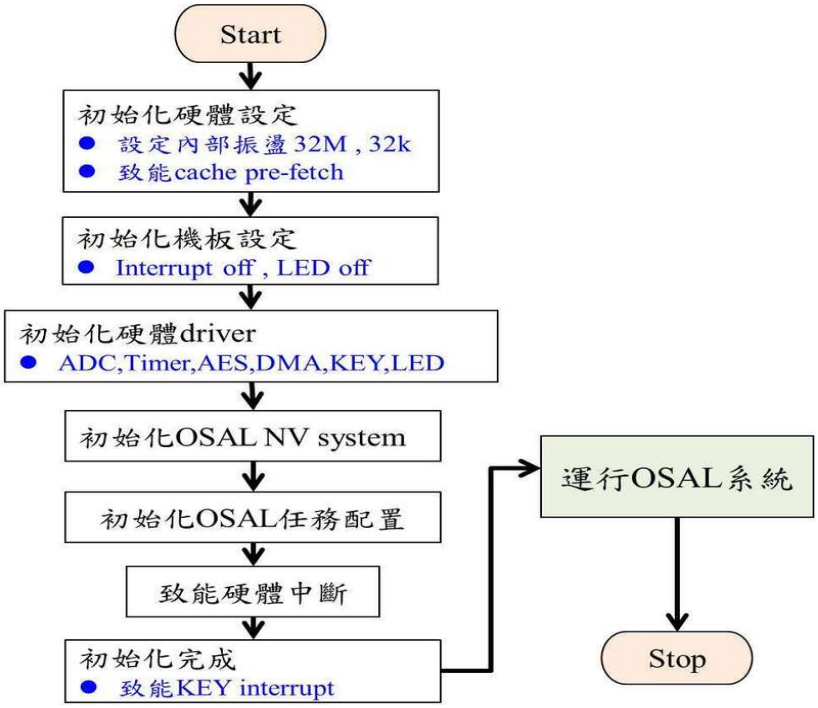

圖13 軟體初始化流程圖

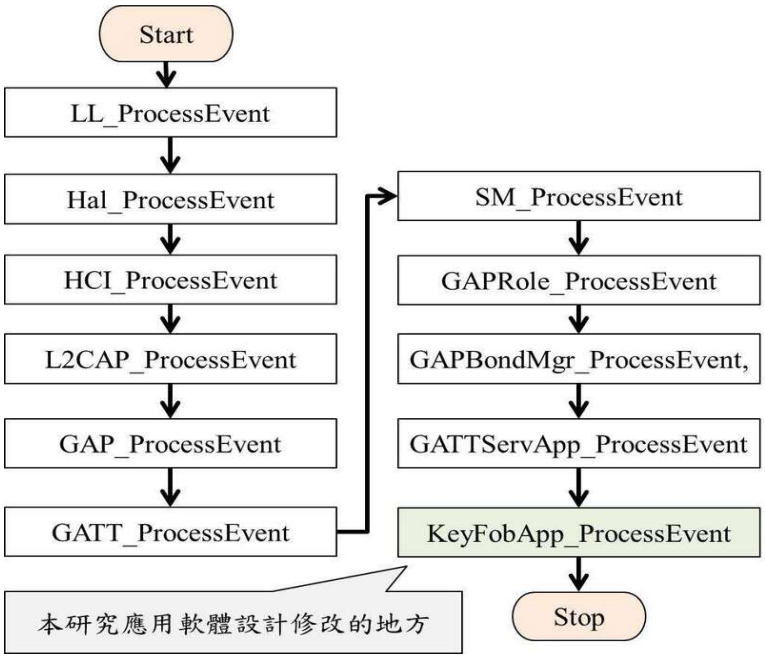

圖14 OSAL任務事件流程圖

表2 致能資料傳輸的UUID表

Type	Type(#define)	Hex/Text	GATT server Permissions	Notes
0x2800	GATT_PRIMARY _SERVICE_UUID	**0xFFA0** ACCEL_SERVICE_UUID	GATT_PERMIT_ READ	開始胎壓、胎溫、電池開始Service
0x2803	GATT_CHARACT ER_UUID	0A(READ/WRITE) Handle:0 UUID:**0xFFA1**	GATT_PERMIT_ READ	資料傳輸致能特徵宣告
0xFFA1	None	Handle:0 致能資料(1byte)	GATT_PERMIT_ READ/WRITE	資料傳輸致能特徵資料值
0x2901	GATT_CHAR_US ER_DESC_UUID	Handle:0 資料(14byte)	GATT_PERMIT_ READ	描述字節

每一個監測模組有屬於自己的裝置名稱，且不允許重複，此裝置名稱是與 APP 傳輸資料時的身份識別。藍芽聯盟 SIG 定義了 GATT Service 的各項功能的 UUID，APP 與監測模組的溝通，則以 Service UUID 作為通道的主識別碼，再以特徵碼(Characteristic)作為動作描述說明。本研究利用 KeyFob 套件中的 service UUID 及特徵碼說明，表 2 為致能資料傳輸的 UUID 表，表 3 為資料傳輸的 UUID 表，表 4 為 power save 致能 UUID 表。

表3 資料傳輸的UUID表

Type	Type(#define)	Hex/Text	GATT server Permissions	Notes
0x2800	GATT_PRIMARY _SERVICE_UUID	**0xFFA0** ACCEL_SERVICE_UUID	GATT_PERMIT_ READ	開始胎壓、胎溫、電池開始Service
0x2803	GATT_CHARACT ER_UUID	10(NOTIFY) Handle:0 UUID:**0xFFA3**	GATT_PERMIT_ READ	胎壓、胎溫、電池電壓的特徵宣告
0xFFA3	None	Handle:0 監測資料(1byte)	None	胎壓、胎溫、電池電壓的特徵資料值
0x2902	GATT_CLIENT_C HAR_CFG_UUID	Handle:0 00:00(2byte)	GATT_PERMIT_ READ/WRITE	胎壓、胎溫、電池電壓的特徵結構

表4 power save致能UUID表

Type	Type(#define)	Hex/Text	GATT server Permissions	Notes
0x2800	GATT_PRIMARY _SERVICE_UUID	**0x1803** LINK_LOSS_SER VICE_UUID	GATT_PERMIT_ READ	開始 power save Service
0x2803	GATT_CHARACT ER_UUID	0A(READ/no respond) Handle:0 UUID:**0x8888**	GATT_PERMIT_ READ	power save 設定為不回覆的特徵宣告
0x8888	CUSTOMIZE_CO MAND_UUID	Handle:0 設定資料(1byte)	GATT_PERMIT_ READ/WRITE	power save 設定命令特徵值
0x2803	GATT_CHARACT ER_UUID	12(READ/no notify) Handle:0 UUID:**0x8889**	GATT_PERMIT_ READ	power save 設定為不回覆的特徵宣告
0x8889	CUSTOMIZE_DA TA_UUID	Handle:0 設定資料(1byte)	GATT_PERMIT_ READ	power save 設定資料特徵值
0x2902	GATT_CLIENT_C HAR_CFG_UUID	Handle:0 00:00(2byte)	GATT_PERMIT_ READ/WRITE	power save 的特徵結構

當掃瞄裝置(iPhone5 的 APP)啟動掃瞄 Scan，且監測模組啟動廣播，廣播訊息以每 2 秒發送，當兩者相互連結成功，APP 會透過致能資料傳輸 UUID 通知監測模組致能資料傳輸，才能致能資料傳輸的通道，APP 會對監測模出 6 秒 iOS Device 會判定藍芽斷線，1.7 秒設計是允許漏接兩筆連接訊息還能與 iPhone5 正常連接動作，組下進入 power save 的命令，監測模組接獲命令於 20 秒後進入省電 power save mode，監測模組與 APP 的連接訊息發送間隔時間會由 0.03 秒改為 1.7 秒，iOS Device 執行 BLE 裝置最長連接的監控時間是 6 秒，若超傳送資料的 1 秒間隔時間則不改變，當然監測模組的發射功率、發送的傳送資料與連接訊息的間隔時間都是與電流消耗電池壽命息息相關。

由於直接式胎內 TPMS 監測模組因安裝於輪胎，其環境十分惡劣，且經常性的震動，監測模組的外型必須密合，是不能讓使用者能拆卸並更換電池，所以當電池出現低電壓顯示，幾乎代表要購買新品。電池電量的消耗是 TPMS 監測模組的設計重點，且傳統 TPMS 平時是不發射，需要等到有 G-Sensor 訊號，來判定輪胎有轉動才會發射訊息給中央顯示器，然而輪胎未轉動前就發生胎壓胎溫異常，則不易偵測出。本研究的監測模組在輪胎未轉動時以 BLE 持續廣播，嘗試與掃瞄裝置 iPhone5 連接。圖 15 測試的連線方式，以 10Ω 電阻與裝置串聯，以探棒測量 10Ω 電阻兩端電壓，將測量到的電壓除以 10 就是裝置的消耗電流，圖 16 使用三用電表測量的待機電流。利用式(9)計算平均電流，CR2450N 的電量為 600mAh，利用式(10)可計算出電池使用壽命。

$$\text{平均電流} = \frac{\text{發射時間} \times \text{發射電流} + \text{待機時間} \times \text{待機電流}}{\text{總時間}} \tag{9}$$

$$\text{電池使用壽命} = \frac{\text{電池電量}}{\text{平均電流}} \tag{10}$$

監測模組發佈廣播消耗電流分析，圖 16、17、18 為消耗電流量測圖。式(11)計算出平均消耗電流 46.8μA，式(12)計算出 CR2540N 電池壽命 12820 小時，約 534 天。

$$\text{平均消耗電流}: \frac{3.9ms \times 23.2mA + (2000ms - 3.9ms) \times 1.6\mu A}{2000ms} = 46.8\mu A \tag{11}$$

$$\text{電池壽命}: \frac{600\,mAh}{46.8\mu A} = 12820 \text{ 小時} = 534 \text{ 天} \tag{12}$$

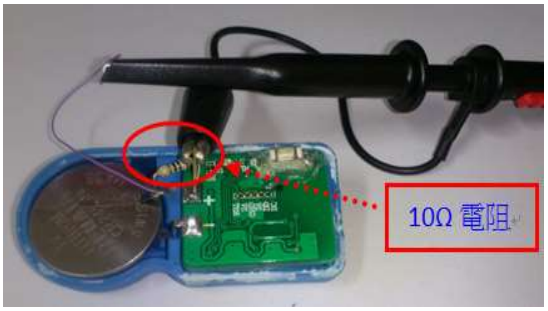

圖15 BLE消耗電流測量圖

圖16 BLE待機消耗電流測量圖

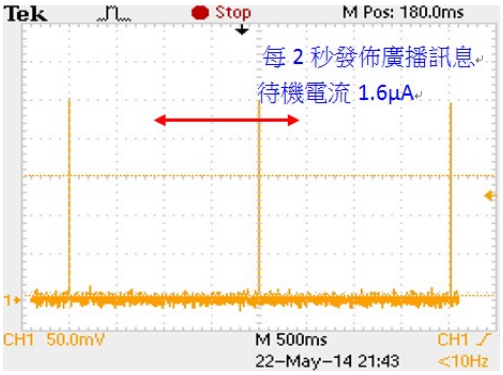

圖17 BLE廣播間隔時間圖

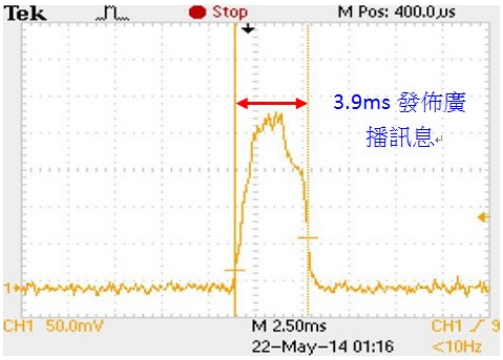

圖18 BLE廣播發佈時間圖

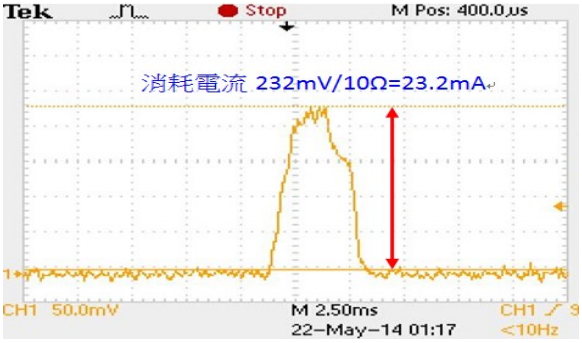

圖19 BLE發佈廣播消耗電流測量

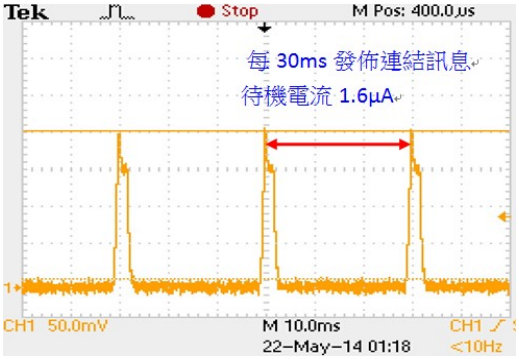

圖20 BLE連結後未進入power save連結間隔時間

圖21 BLE連結後未進入power save連結發佈時間

圖22 BLE連結後未進入power save連結發佈消耗電流測量圖

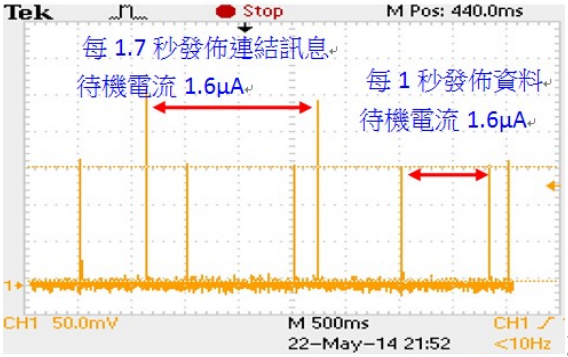

圖23 BLE連結後進入power save連結間隔時間

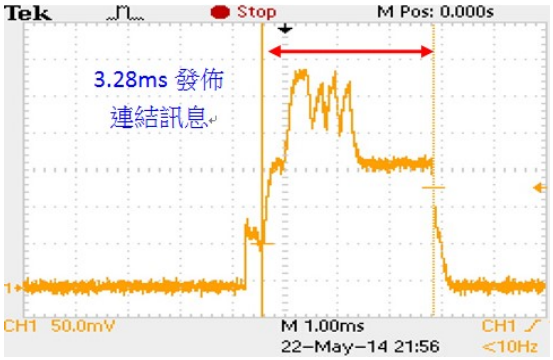

圖24 BLE連結後進入power save連結發佈時間

監測模組連結後未進入 power save 模式消耗電流分析，圖 20、21 與 22 為消耗電流量測圖。式(13)計算出平均消耗電流 1.67mA。此狀態會維持 20 秒，20 秒後 BLE 監測模組會進入 power save mode。

$$\text{平均消耗電流}:\frac{2.84ms\times17.6mA+(30ms-2.84ms)\times1.6\mu A}{30ms}=1.67mA \tag{13}$$

監測模組連結後進入 power save 模式消耗電流分析，圖 23、24、25、26 與 27 為消耗電流量測圖。計算總時間 17.042 秒，連結動作 10 次共計 32.8ms，資料傳送 17 次共計 42.84ms，待機時間 16984ms，式(14)得平均消耗電流 95.8μA，式(15)得 CR2540N 電池壽命 6263 小時，約 261 天。

$$\text{平均消耗電流}:\frac{32.8ms\times26.2mA+25.2ms\times16.8mA+16984ms\times1.6\mu A}{17042ms}=76.9\mu A \tag{14}$$

$$\text{電池壽命}\ :\frac{600\,mAh}{76.9\,\mu A}=7802\ \text{小時}\ =325\ \text{天} \tag{15}$$

圖25 BLE連結後進入power save連結發佈消耗電流測量圖

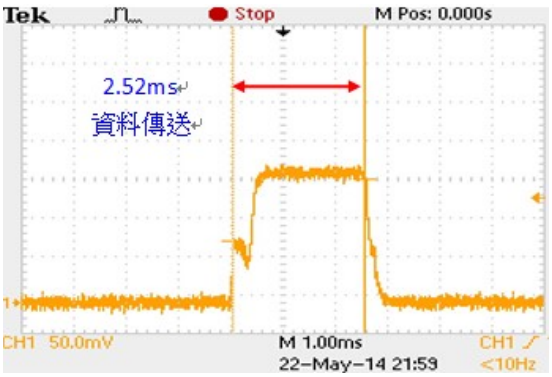

圖26 BLE連結後進入power save資料傳送時間

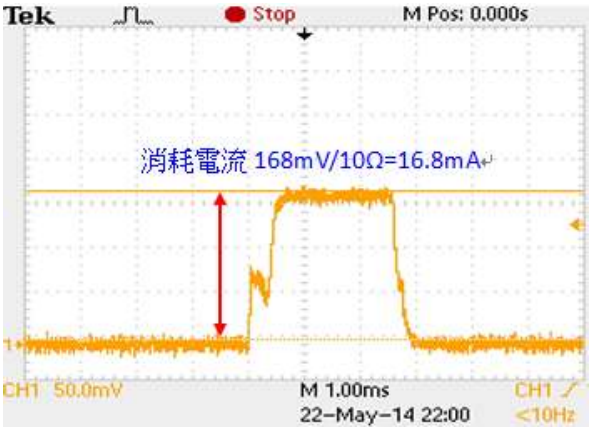

圖27 BLE連結後進入power save資料傳送消耗電流測量圖

圖28 TPMS APP畫面圖

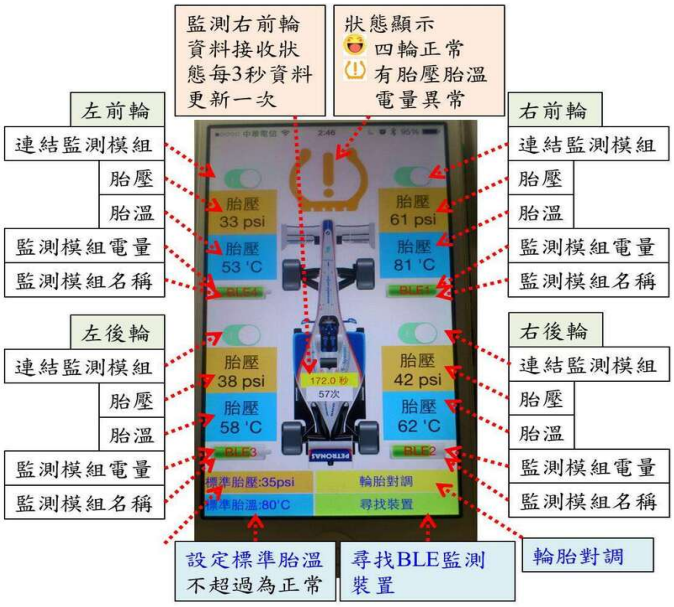

圖29 TPMS APP說明圖

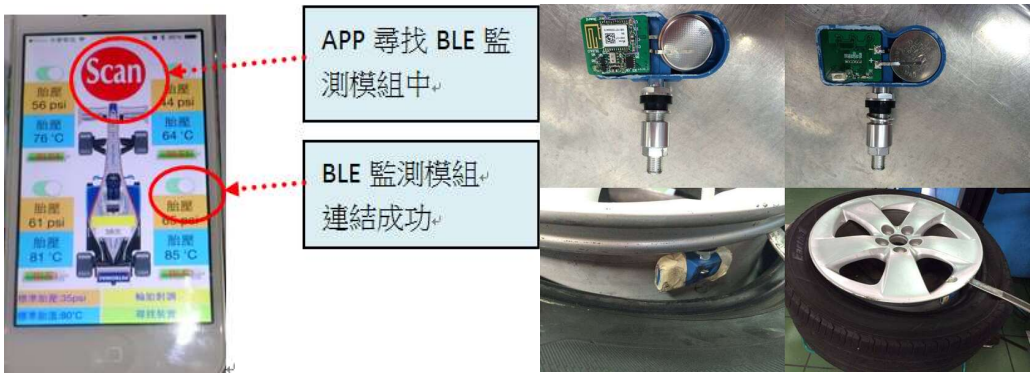

圖30 BLE監測模組連結成功狀態

圖31 BLE監測模組安裝圖

以上計算出來的平均消耗電流與電池壽命是以長時間持續使用來計算，若依 TPMS 實際功能需求設計，依 G-Sensor 的運算來改變資料傳送的間隔時間以延長待機時間，結合 BLE 接收信號強度(received signal strength indication, RSSI)調整 BLE 裝置的發射功率，就能設計出更省電的 BLE TPMS 監測模組，有機會能符合 TPMS 的電池壽命要長達 5~7 年的目標。

本研究的 TPMS 顯示器將 APP 安裝於 iPhone5，利用 Mac Xcode 開發符合 TPMS 功能的 APP，圖 28 為 TPMS APP 畫面圖，此 APP 使用 BLE4.0 Framework 為設計基礎，此 Framework 已處理完成 BLE4.0 相對應的 API，並已完成與 BLE 監測模組對應的 UUID 通道，APP 軟體要識別監測模組，則以 BLE 的 Device Name 來區分，圖 29 為 APP 圖示功能說明圖。

使用此 APP 前必須先開啟 iPhone5 的藍芽設備，使用者並不需要對各個 BLE 監測模組做藍芽配對的動作，識別 BLE 監測模組是利用 APP 來處理，於 APP 尋找裝置功能開啟時，iPhone5 APP 為主機的身份，會送出掃瞄訊息給 BLE 監測模組，並開啟 120 秒的掃瞄時間，超過此掃瞄時間 APP 不會接受 BLE 監測模組的廣播訊息，於掃瞄時間內，若 BLE 監測模組正在發送廣播訊息，且發佈廣播訊息與識別名稱是 APP 可以認可，則 APP 會記錄該 BLE 監測模組的 Device Name，以利後續資料接收的身份識別，APP 會將該輪的(連結監測模組)顯示為開啟狀態，圖 30 所示為連結成功狀態。

此 APP 可同時連接四個 BLE 監測模組，尋找裝置時必須從右前輪、右後輪、左後輪、左前輪依序學習，當 APP 學習 BLE 監測模組成功且連結無誤，APP 會透過 Service UUID(0x1803)特徵碼為 0x8888 與 0x8889 指示 BLE 監測模組在 20 秒後進入 Power Save 模式，連結成功的 BLE 監測模組就會定時發佈連結訊息與傳送胎壓、胎溫、電池電量資料數據給 APP 接收。

TPMS 監測模組 BLE1 安裝於輪胎內，如圖 31。測量 APP 接收監測模組 BLE1 傳送的連結訊號是否會有斷線現象，並測量 APP 是否會漏接由監測模組 BLE1 所傳送的資料，APP 與監測模組距離約 2~3 米。監測模組 BLE1 模擬胎壓、胎溫與電池電量資料，每筆資料分別以 0.5 秒為間隔傳送給 APP，APP 每 1.5 秒更新數據圖示，並計算數據接收的次數，及開啟 0.5 秒計時器，比對時間計時與接收次數，由圖 32 與式(16)顯示 iPhone5 沒有漏接由監測模組 BLE1 送出的資料與連結訊息。

$$\text{接收次數} = \frac{\text{計時時間}}{1.5\text{秒}} \tag{16}$$

圖 33 是 APP 尋找裝置 Scan 圖，圖 34 是一般模式下 APP 接收 BLE 監測模組圖，APP 能每 1.5 秒正常更新並顯示各個監測模組狀態數據，圖 35 為測試 BLE 監測模組斷線圖，APP 能反應有模組離線，此功能可用來判斷 TPMS 監測模組是否有損壞的狀況。

圖 32 APP 測試接收圖

圖 33 APP 尋找裝置 Scan 圖

圖 34　APP 接收 BLE 監測模組圖

圖 35　測試 BLE 監測模組斷線圖

伍、結論

APP 運行 BLE4.0 通訊，與 TPMS 監測模組建立資料互傳機制，APP 可正確收每一筆由監測模組送出的連結與資料訊息，且達到傳統直接式胎內 TPMS 功能需求包括(1)顯示四顆輪胎胎壓、胎溫與電池電量；(2)執行輪胎高低壓警告、高溫警告、快速漏氣警告與監測模組斷線警告；(3)設定前後輪胎的標準胎壓與胎溫；(4)四顆輪胎 ID 學習模式，依照右前輪、右後輪、左後輪、左前輪順序學習；(5)四種輪胎對調模式，前後輪胎平行對調、前後輪胎交叉對調設定、前輪交叉調到後輪、後輪交叉調到前輪；(6)TPMS 監測模組的電池壽命 5~7 年，需運用 BLE4.0 的低功耗特性與 G-Sensor 的省電機制；(7)TPMS 監測模組的設計重視體積大小與重量，本研究 TPMS 監測模組以 TI CC2541 主要晶片，必須結合各項感測器，在電路設計上所使用的元件比整合性 TPMS 晶片多，但 PCB layout 設計也都克服，證明 BLE4.0 的 TPMS 硬體結構可行。此 TPMS 系統的顯示器以 iPhone5 APP 設計，使用 BLE4.0 通訊不需先執行 iPhone5 與監測模組的藍芽配對機制，只需在 iPhone5 上開啟藍芽裝置，經 APP 與監測模組的學習機制，廣播拓撲網路結構完成學習，星型拓撲網路結構傳達資料訊息，完成應用在 TPMS 系統裡的一對多與多對一的藍芽主從結構。

參考文獻

[1] 朱其偉 (2005)。**應用進階加密標準之矽智產產生器進行設計空間之探討**(碩士論文)。國立中山大學資訊工程學系，高雄市。

[2] 黃煜程 (2006)。**改良型胎壓偵測系統之設計**(碩士論文)。逢甲大學自動控制工程學系，台中市。

[3] 龔至宏 (2004)。**Simple communication system and rfid application**。智慧型機電輔具實驗室。

[4] 李秉寰 (2008)。**使用振幅相位鍵移之么正空時調變**(碩士論文)。國立中央大學通訊工程學系，桃園市。

[5] 邱春源 (2008)。**基於FPGA之GFP訊框搜尋最佳化的研究**(碩士論文)。國立臺灣科技大學電機工程系，台北市。

[6] 鄭皓云 (2005)。**藍芽模組與處理器之連接控制設計與實作**(碩士論文)。國立成功大學電機工程學系，台南市。

[7] 施建仲 (2010)。**使用線性加速感測晶片的計步器**(碩士論文)。國立中央大學資訊工程研究所，桃園市。

[8] 朱克剛 (2013)。**iOS7程式設計實戰-171個快速上手的開發技巧**。碁峰資訊股份有限公司，台北市。

[9] Texas Instrument (2011). *LPRF San Diego Bluetooth low energy deep dive.* Retrieved from: https://e2e.ti.com/support/wireless_connectivity/m/videos__files/653593

[10] Texas Instrument (2012). *2.4-GHz bluetooth™ low energy and proprietary system-on-Chip, CC2541 datasheet.* Retrieved from: http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2541.pdf

[11] J. Villegas. (n.d.). Bluetooth low energy version 4.0, helping create the internet of things. Retrieved from: https://docuri.com/download/bluetooth-le_59c1cfbff581710b2863fc77_pdf

[12] Texas Instrument (2012). *CC2540/41 system-on-chip solution for 2.4-GHz BLE applications user's guide (SWRU191C).* Retrieved from: http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2540.pdf

[13] J. Decuir (2010). Changing the way the world connects. Bluetooth 4.0: Low Energy. Retrieved from: https://0a.fi/wp-content/uploads/2016/02/BTLER3.pdf

[14] N. H. Tan. (2010). Tire pressure monitoring system (TPMS) with SP37. Retrieved from: https://www.infineon.com/export/sites/default/cn/product/promopages/ATV_Symposium/China_ATV_Symposium_TPMS.pdf

[15] Tire pressure monitoring sensor SP37 LF application note. (2011). Retrieved from: https://www.infineon.com/dgdl/ SP37_LF_v1.0.pdf?fileId=db3a30433899edae0138be4e8e2931af

[16] Microchip Technology (2009). *AN238 tire pressure monitoring (TPM) System*. Retrieved from: http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00238C.pdf

[17] Microchip Technology. (2000). *CRC generating and checking, AN730.* Retrieved from: http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00730a.pdf

[18] Analog Devices. (2011). *ADXL345 datasheet*. Retrieved from: http://www.analog.com/media/en/ technical-documentation/data-sheets/ADXL345.pdf

[19] Bluetooth SIG (2013). *Bluetooth core specification version 4.0.* Retrieved from: https://www.bluetooth.org/docman/handlers/downloaddoc.ashx?doc_id=229737&_ga=2.257433289.39517920.1510664689-1444990489.1510664689

[20] Freescale Semiconductor (2012). *MPL115A2 datasheet.* Retrieved from: https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/MPL115A2.pdf

[21] Freescale Semiconductor. (2012). *How to implement the Freescale MPL115A digital barometer (AN3785 application note).* Retrieved from: https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN3785.pdfnote/AN3785.pdf

[22] S. Kamath, and J. Lindh. (2012). *Measuring Bluetooth® low energy power consumption (AN092 application note).* Retrieved from: http://www.ti.com/lit/an/swra347a/swra347a.pdf

[23] B. Yu, and L. S. Xu. (2012). *Bluetooth low energy based mobile electrocardiogram monitoring system,* 763-767, IEEE International Conference on Information and Automation, Shenyang, China.

[24] J. Liu, C. F. Chen, and Y. Ma (2012). Modeling neighbor discovery in bluetooth low energy networks, *IEEE Communications Letters, 16*(9), 1439-1441.

[25] E. Mackensen, M. Lai, and T. M. Wendt. (2012). *Bluetooth low energy based wireless sensors*, 1-4, in proceeding IEEE Sensors, Taipei, Taiwan.