

節能的動態連結式無線插座系統

An Energy-Saving Reconfigurable Wireless Outlet System

謝嘉維 紀光輝 江季翰¹ 何前程

國立雲林科技大學電機工程研究所

{ g9612719, chikh, futureho }@yuntech.edu.tw

¹ 國立虎尾科技大學資訊工程研究所

jhjiang@sunws.nfu.edu.tw

摘要

本論文運用 IEEE 802.15.4 為基礎的網路技術，設計並實作可即時組態的(reconfigurable)無線插座系統，偵測插座上的電器用電動態行為，並搭配智慧型軟體介面，即時獲取各個插座的用電狀況。整個系統之軟、硬體皆自行開發，利用無線通訊方式、經由軟體介面簡便設定即可動態規劃插座與插座或開關按鈕與插座之間的連動關係，藉由判斷插座上的裝置是否處於待機狀態，以決定是否開啟或關閉其他相關插座的電源，進而達到節能的目的地。期盼本研究產出能利益國內之業界與教育界在智慧化生活空間領域之技術深耕。

關鍵詞：家庭自動化、無線網路、IEEE 802.15.4、JenNet

Abstract

This paper presents an IEEE 802.15.4-based software-hardware codesign and implementation of a wireless outlet system. Over the wireless media the reconfigurable outlet can be programmed online via a soft console to sense the load current of each socket thereon, learning whether or not the plugged-in appliance is left on standby. If so, the socket can be shut off electricity provision for power saving purpose. The outlet can also operate under the control of a wireless switch and report electricity usage dynamics to the soft console for remote monitoring. Hopefully this study is of avail to other practical research in intelligent living space.

Keywords: home automation, wireless network, IEEE 802.15.4, JenNet

1. 前言

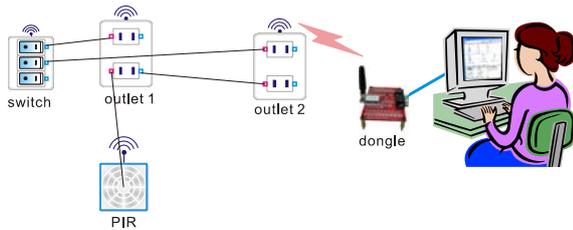
本論文屬於新興產業中之「數位生活」領域，該產業在 2015 年的全球市場預估有 1 兆 6,600 億美元的規模[10]，而我國貢獻其中的產值可達 830 億美元。由於市場龐大，若能掌握產業發展相關技術，可造就我國更多機會。「數位生活」領域涵蓋智慧化居住空間科技整合應用，將 IT 技術運用於生

活，提供安全、節能等用途，塑造優質生活環境，或涵蓋資訊應用與整合技術開發，發展家庭自動化(home automation)等前瞻技術。本論文開發智慧化居住空間之節能與家庭自動化技術，探究 3C/4C 家電裝置如何透過無線網路互動，以低功耗之 IEEE 802.15.4 [1]通訊協定為基礎，減少家用電器待機耗電的浪費，並以使用者觀點出發，藉由軟、韌、硬體的方式實現所改進的技術。

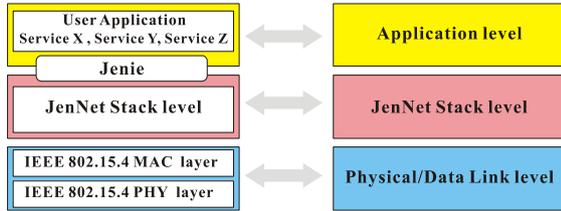
在智慧化空間中，並不一定所有的電器裝置均具備足夠的智能，譬如：常用的 DVD 播放機、電視機、微波爐、電腦主機與螢幕等，尤其具有遙控與螢幕顯示功能的電器在待機狀態仍耗費微幅的電流。為了節約長時間待機導致能源消耗，我們設計一種可動態組態化的(reconfigurable)無線插座，再透過設計的無線開關或軟體介面，控制這些插座是否供電給所連接的裝置。使用者可藉由開啟或關閉開關，控制這些電器是否得以自無線插座取得電力。此外，我們亦能偵測電器用電的動態行為，讓插座自行斷電。若電器無法從插座取得供電，即可達成零待機耗電的目的。

所開發的無線插座主要仍安置於居家空間之固定位置，以利電器安插使用，並與市電系統連接，加上內建之開關電路，控制市電是否得以通過插座提供電器所需之電力。該內建之電路將接受無線開關發出命令，導通或阻絕市電的供給。無線開關裝置則可固定於牆壁某處(猶如一般家用開關)或以遙控器的形式實作。

目前家用 3C/4C 產品非常普及，許多這類的電器即使在待機狀態中仍消耗可觀的電力。舉例來說，電腦主機待機若以每小時 6.6 瓦(約 0.06 安培，110V)來計，假設一天有 12 小時處於待機狀態，則單一主機一年即浪費掉 28,908 瓦電力。全國如果有一萬台這樣的主機，則耗費 289,080 千瓦，相當於發電時需多製造了 180.675 噸的二氧化碳。這等於一般汽車行駛約 2,230,555.6 公里所排放的二氧化碳量，足以繞行地球 55.7 圈；若以時速 100 公里的速度來計，必須不眠不休地連續行駛 2.5 年才能達到這樣的消耗量。如果加上螢幕、印表機及一般家用電器，可節省的電力將更加可觀。由此可見，若能有效地節省裝置待機耗電，可省下一座發電廠。



圖一：以軟體系統設定無線插座之情境圖



圖二：軟體系統所使用的通訊協定架構

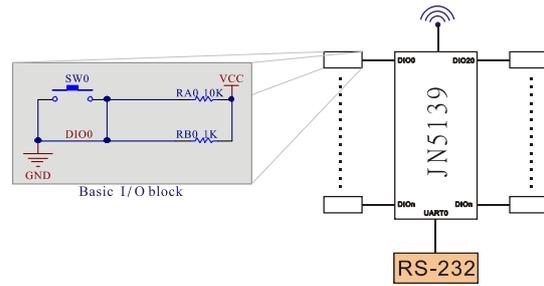
使用者可透過視覺化操作介面(graphical user interface, GUI)，以滑鼠點選視窗中所見之元件，直接設定裝置之間的邏輯關係。如圖一所示，使用者只需在電腦視窗畫面上的元件之間透過滑鼠進行簡單的拉線連接，即可透過 dongle (遠端組態監控模組)將所有連線關係(binding table)分別傳送至各裝置，連線關係就可長存於各裝置上，之後毋須再透過電腦維持其連線關係。另外，使用者亦可從電腦端直接觀察所有裝置的用電情況(由無線插座回報)及電流、電壓波形等資訊，因此亦可作為遠端維護(OAM)之用。

針對電器用電偵測的技術，我們將以狀態機(finite state machine)描述如何判別正常的電流信號與無效的雜訊，並在插座上的電器啟動後自動回傳電流波形訊號至使用者圖形介面。

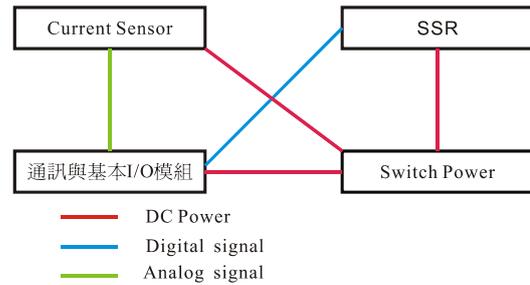
2. 系統雛形

我們使用 JenNet、以 Microsoft Visual C#完成軟體系統的實作。JenNet 協定堆疊(protocol stack)是由 Jennic 公司提供的低耗能解決方案，可應用於許多無線監控環境[7]。JenNet 提供類 ZigBee 通訊機制，但較 ZigBee 精簡。我們所開發的軟體系統使用的協定堆疊架構如圖二所示，簡述如下：

- 應用層(Application Level)：此功能區塊提供節點的應用程式功能，可透過呼叫 Jennic 公司所開發的 Jenie API 控制硬體週邊及通訊。
- JenNet Level：此功能區塊為 Jennic 公司所開發的網路層(Network Layer)，主要功能為透過 IEEE 802.15.4 協定控制網路定址(addressing)與訊息繞送。任務包括起始網路、增加或移除網路節點、繞送訊息至目的地、對交換的訊息作加解密等。
- Physical/Data Link Level：本層協定採用 IEEE 802.15.4 標準規範機制。Physical Layer 負責無線傳輸的實體媒介，而 Data Link Layer 負責回應、傳遞、組合訊息。



圖三：通訊與基本I/O模組



圖四：交流電源控制與感測模組互動示意圖

我們尤其利用 JenNet 中的兩個機制：

- Discovery：當網路某個節點要和其他節點通訊時必須先找到該網路節點。此機制使得網路節點得知其他節點的資訊，例如節點的網路位址或所能提供的服務。
- Binding：提供節點與節點之間服務的虛擬連線，並提供一對一或一對多的連線關係。Binding 須由兩種節點上的服務所指派來源位址上所產生的 service ID 以及目的位址上可接收的 service ID 做對應。在 discovery 階段找出服務對應到的位址，並將 binding table 儲存在來源節點。

2.2 通訊與基本 I/O 模組

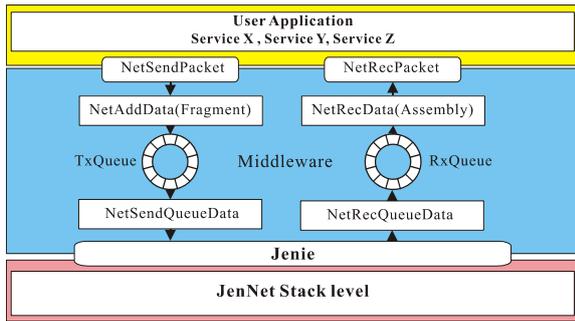
本模組實現無線通訊、RS-232 通訊與基本 I/O 控制，主要硬體區塊如圖三所示：

- JN5139：Jennic 公司所開發的無線模組，整合了微處理器、IEEE 802.15.4 實體層與串列通訊介面、DIO 等[6]。
- RS-232：連接至 JN5139 的 UART0，可做為除錯用途與實作遠端監控之電腦程式介面與各節點的通訊橋樑。
- Basic I/O block：I/O 視需求，每支 DIO 接腳可選擇連接 Touch switch 或 LED。

2.3 交流電源控制與感測模組

此模組功能主要是感測交流電流電壓信號，並可在實現 Service Binding 後受遠端節點控制，模組電路可分成以下四個區塊(圖四)，略述如下：

- Switch Power：主要提供電流感測器感測時所需的電壓，以及供應通訊與基本 I/O 模組電池充電時所需的電源。



圖五：Middleware 與上下層協定的互動示意圖

- 電流感測元件 (Current Sensor)：負責感測 AC 插座上的負載電流，並將感測後的電流信號轉換成電壓信號送至通訊與基本 I/O 模組。
- SSR (Solid-State Relay)：開啟與關閉 AC 插座上的電源。
- 通訊與基本 I/O 模組：其主要功能在接收遠端控制信號、量化電流感測器所得到的類比信號、控制 SSR 開關與透過無線傳輸方式將電流感測後的量化值傳至 Coordinator。

2.3 在無線通訊模組導入 Middleware

我們發現 JenNet 網路層對於過長封包並無自動切割(fragmentation)與重組(reassembly)功能。為讓系統的資料傳輸能有效地進行，我們在應用層與 Jenie Interface 之間導入自行開發的 middleware，以實現封包切割與重組的功能，如圖五所示，處理的流程如下。傳送資料時，透過 NetAddData()函式偵測封包長度是否超過 JenNet 容許的單一封包長度。若超過，便將封包切割後送至傳送端的佇列(TxQueue)，之後 NetSendQueueData 會定時地將 TxQueue 內的資料送出，並具備傳送錯誤時重送的功能。

當偵測到接收封包事件發生時，middleware 先透過 NetRecQueueData 將接收到的資料送入 RxQueue 中，NetRecData()函式將定期檢查 RxQueue 中資料是否已經完整。若完整，則 NetRecData()通知上層的應用程式，呼叫 NetRecPacket 接收資料。

在 RS-232 通訊方面因為牽涉到各節點須有獨立的專用控制面板，且須在偵測到網路節點信號時在 GUI 介面動態產生相對的圖示(icon)，因此在 RS-232 通訊部份亦設計了封包格式，並加入的 checksum 的功能，以防止非預期的狀況發生。

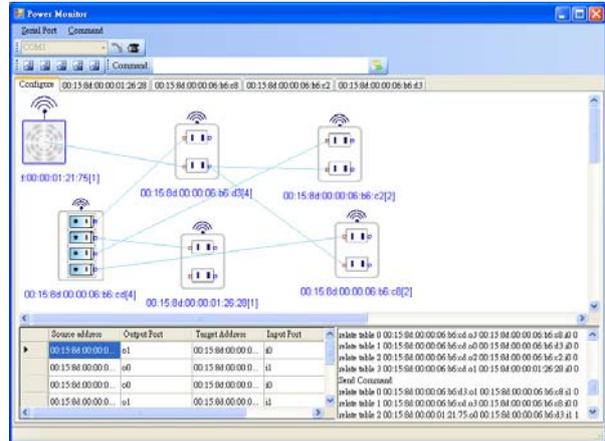
2.4 成品實體

圖六是系統成品圖。本系統由四個硬體電路與遠端監控組態軟體組成，硬體電路主要為無線插座(圖六(a))，掛載遠端組態監控模組，內建無線通訊功能)、無線開關(圖六(b))、圖六(c)為軟體系統畫面。電路佈局請見<http://winlab.ee.yuntech.edu.tw/Binding-schematic.zip>

軟體系統提供使用者容易操作的圖形介面，可透過圖形介面遠端組態插座與開關、連線關係並可



(a)遠端組態監控+無線插座 (b) 無線開關



(c) 軟體之組態連線畫面

圖六：軟硬體系統雛形

查看各別插座上的電器的電流、電壓波形，亦可透過圖形介面遠端遙控各插座開關與設定。更詳細的說明請參見[5]。

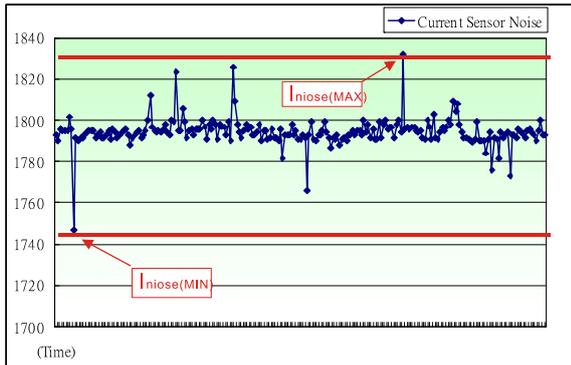
3. 電流感測

無線插座上的電流感測器將電流經由霍爾元件 (Hall component)[8]轉換成電壓信號，之後 ADC (類比數位轉換器)將電流感測器所產生的類比信號量化，並將量化後的資料透過無線傳輸傳送至遠端組態監控模組(dongle)，再經由 dongle 將資料轉送至 PC 端。而我們感興趣的信號是電源插座上的電器裝置啟動後所產生的電流值，但在電源插座沒有啟動任何電器裝置的狀況下，電流感測器亦會產生雜訊，若當電器沒開啟的情況下也將電流 ADC 量化的數據傳送至 dongle，不僅耗電而且也浪費頻寬。因此，在電流感測時吾人只需在電器使用時才傳送電流電壓信號給 dongle。

3.1 工作原理

為了達到節省頻寬以及節省無線傳輸時所產生的耗電，必須分辨何時為雜訊，何時有電流信號，並在有電流信號時作電流波形資料傳輸，以下將對電流感測器所讀取到的雜訊做探討，並實現有正常電流負載時才傳送波形的動作。

圖七是電流感測器在無電流情況下，經由 JN5139 無線模組內建的 ADC 轉換後的量化波形。從圖中可看到在沒有電流的情況下，ADC 亦會偵測



圖七：無電流信號時電流感測器讀取到雜訊

到雜訊，若使用 DSP (Digital Signal Processing) 的技術應有幫助，可在無電流的情況下使雜訊信號完全消除，使其成為純直流值。除了以 DSP 的技術來解決此問題之外，我們提出一個更單純有效的方式，消弭在未感測到電流信號時所作的無意義的資料傳輸，方式如下。

在第一次無線插座接上電源後會持續 1 秒鐘的讀取 ADC 轉換所得到的最大值 Inoise(MAX) 與最小值 Inoise(MIN) 並儲存在 ROM 內當作雜訊參考值。若大於或小於此參考值即表示插座上有電流，但亦有可能是更大的雜訊，但雜訊為非週期性的信號，而電流為週期性的信號，因此若大於 Inoise(MAX) 的量化數值或小於 Inoise(MIN) 的量化數據次數大於特定連續次數我們才會判別為有效信號，並在下一個週期開始取樣並傳送資料，圖八(b)是電器裝置啟動後連續大與 Inoise(MAX) 或小於 Inoise(MIN) 時的連續次數會比在雜訊信號情況下多許多。

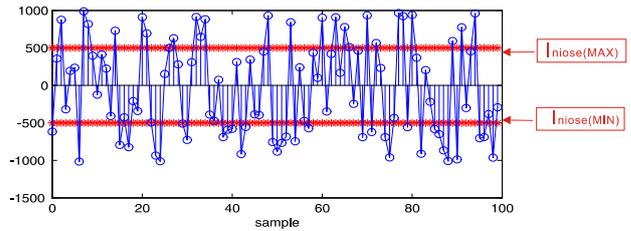
3.2 狀態機

圖九為電流感測狀態機，圖十為觸發信號狀態機，這兩個狀態機為個別獨立的兩個中斷函式。圖中各參數定義如下：

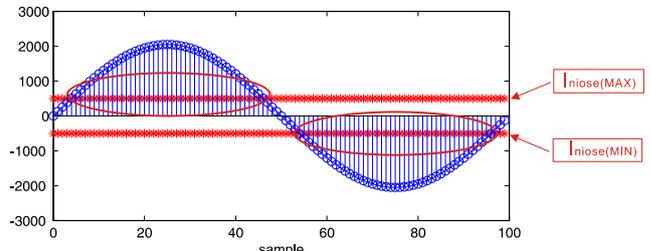
- Ndtime：雜訊偵測計時器；
- TR：觸發次數計數器；
- SF：取樣旗標，SF=true 時表示可以開始取樣；
- IRES：由 ADC 讀入的電流感測器量化數值；
- Inoise(MAX)：雜訊最大邊界值；
- Inoise(MIN)：雜訊最小邊界值；
- CTH：取樣值大於 Inoise(MAX) 或小於 Inoise(MIN) 之連續次數，當 CTH=>20 時表示為有效信號；
- S：為紀錄 IRES 之集合。

動作方式：

S0 與 Ts0：電源 Power on 或 reset 時，電流感測狀態機(圖九)與觸發信號狀態機(圖十)分別進入初始化狀態 S0 與 Ts0。在 S0 狀態時會持續取樣 1 秒鐘，並在 1 秒鐘內將取樣的量化最大值放入 Inoise(MAX) 變數中，最小值會放入 Inoise(MIN) 之中，接著進入 S1 狀態。



(a) 雜訊信號之連續取樣次數



(b) 正常信號之連續次數

圖八：電流訊號取樣效果的差異比較

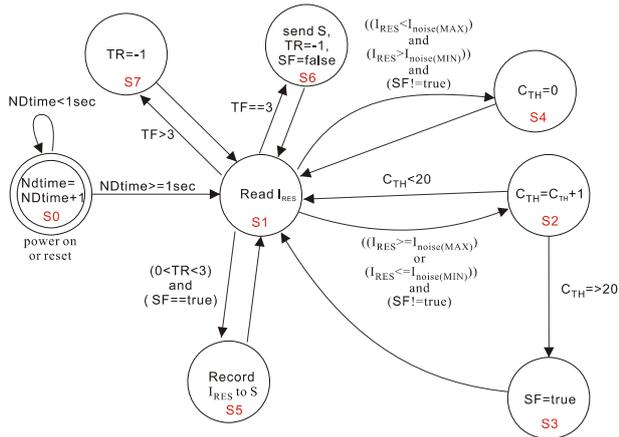
S1：電流感測器之 ADC 轉換完成時發生中斷，發生中斷後會讀取 ADC 的量化值 IRES 並判斷 IRES 是否大於 Inoise(MAX) 或小於 Inoise(MIN) 雜訊邊界值。若符合條件則 CTH+1(S2 狀態)，若連續取樣達 20 次 IRES 皆大於雜訊邊界值，表示為有效信號，則設定 SF=true 將於下一個觸發信號 TR 開始時取樣。當 SF=true 時觸發信號狀態機(圖十)開始上數，此時電流感測狀態機在 S1 與 S5 之間做讀取並將 IRES 放入 S 集合當中，直到取樣達到 3 個 TR 週期。TR=3 個週期後便會進入 S6 的狀態，S6 狀態將 S 集合中的資料透過無線傳輸傳送出去，並設定 TR=-1 及 SF=false 以便下一次信號判斷。若 CTH 在 20 次取樣過程當中，其中一次讀取 IRES 的數值處於 Inoise(MAX) 與 Inoise(MIN) 之間，則會視為雜訊信號並進入 S4 狀態，將 CTH 設為 0。S7 狀態為避免因為 TR 數值在啟動後處於不確定值所設計。

圖十一為 S6 狀態傳送資料至 Coordinator 端後轉換成使用者圖形介面所觀察之波形。此為電源啟動或 Reset 時偵測雜訊邊界 Inoise(MAX) 與 Inoise(MIN) 持續一秒鐘所呈現的畫面。

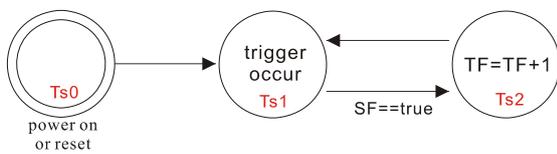
3.3 成果

所提出的電流感測方法已能有效地區分有意義的電流信號與無效的雜訊，並在插座上的電器啟動後，自動回傳電流波形訊號至使用者圖形介面。這個方法經實證有其效果，請參見圖十二之結果畫面。由於唯有在電器在正常工作中，無線插座才會傳送電流電壓信號給 dongle，因此可節省無謂的傳輸、節省電力的耗費。

值得一提的是，在進行電流、電壓波形截取時，若沒有觸發信號將導致使用者在圖形介面看到的波形位置漂移不定，此現象與使用示波器時沒有設準位或邊緣觸發時的狀況相同，而本研究使用交流電壓正緣作為觸發信號，硬體電路使用光耦合器



圖九：電流感測狀態機



圖十：觸發信號狀態機

作信號隔離。

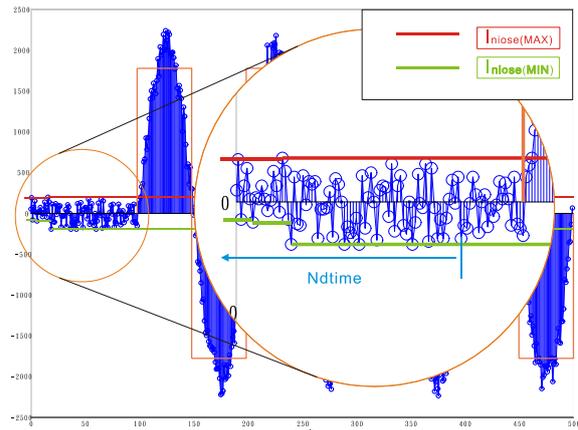
4. 結論

隨手關閉閒置的 3C/4C 電器對多數人而言是可以做到卻又很容易忽略的事情，本系統旨在不需改變使用者習慣即能令安插在無線插座之電器達到零待機耗電的目地(完全斷電)。此外，為了節省實體佈線之成本與不便，我們運用低耗能的 IEEE 802.15.4 無線網路技術為基礎，開發軟硬體系統，以利動態規劃插座之間或開關按鈕與插座之間的互動關係，並自動偵測插座上的裝置用電狀態、決定是否開啟其他相關插座的電源，以達到節能的效果。藉由所開發的視窗軟體系統，使用者能以軟體的方式關閉某些耗電的硬體插座，操作簡便。

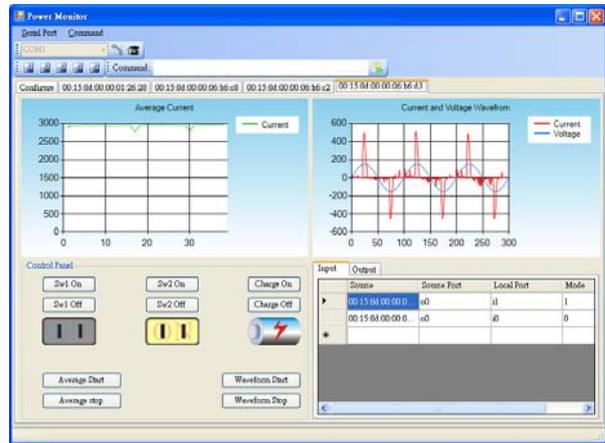
為讓前瞻數位生活能充分落實，家用無線網路是良好媒介。若要使家用無線網路充份發揮效益、讓一般使用者易於接受，應讓無線網路裝置物件化，其概念猶如 USB 裝置，當 USB 裝置插入電腦中，電腦可立即得知該使用那種方式與 USB 裝置溝通以、該裝置擁有那些功能，以及作業系統該如何回應。若將家用網路元件想像如同 USB 裝置，無線網路即可視為匯流排，任何裝置加入網路即可透過使用者圖形介面得知該網路元件之功能，並可透過簡易設定即可使裝置間達到預期的效果，應該可使數位生活應用普及化，達到家庭自動化的目標。

誌謝

本研究由國家科學委員會計畫 NSC 99-2220-E-224-010 及 NSC 101-2221-E-224-077 補助支持，特此誌謝。



圖十一：信號雜訊邊界偵測示意圖



圖十二：無線插座之遠端監控畫面

參考文獻

- [1] IEEE Std 802.15.4, “Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)”, Institute of Electrical and Electronics Engineers, September 2006.
- [2] M. Erol-Kantarci, and H. T. Mouftah, “Wireless Sensor Networks for Cost-Efficient Residential Energy Management in the Smart Grid”, *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 2, No. 2, pp. 314–325, June 2011.
- [3] C. Gomez and J. Paradells, “Wireless Home Automation Networks: A Survey of Architectures and Technologies”, *IEEE Commun. Magazine*, Vol. 48, No. 6, pp. 92–101, June 2010.
- [4] J. Han, H. Lee, and K.-R. Park, “Remote-Controllable and Energy-Saving Room Architecture based on ZigBee Communication” *IEEE Trans. Consumer Electronics*, Vol. 55, No. 1, pp. 264–268, Feb. 2009.
- [5] C.-W. Hsieh, K.-H. Chi, J.-H. Jiang, and C.C. Ho, “Adaptive Binding of Wireless Devices for Home Automation”, (to appear in) *IEEE Wireless Commun.*
- [6] Jennic, Data Sheet: JN5139-001 and JN5139-Z01, JN-DS-JN5139, v1.6, 2008.
- [7] Jennic, JenNet Stack User Guide, JN-UG-3041, Revision 2.0, Sep. 2010.
- [8] R. S. Popović, Hall Effect Devices (2nd Ed.), CRC Press, 2004.
- [9] G. Song, F. Ding, W. Zhang, and A. Song, “A Wireless Power Outlet System for Smart Homes”, *IEEE Trans. Consumer Electronics*, Vol. 54, No. 4, pp. 1688–1692, Nov. 2008.
- [10] 經濟部，“2015 年經濟發展願景第一階段三年衝刺計畫(2007-2009 年)產業發展套案”，經濟部