

設計實作與分析太陽能無線感測節點

朱鴻棋
朝陽科技大學
資訊與通訊研究所
助理教授
hcchu@cyut.edu.tw

蕭衛聰
朝陽科技大學
資訊與通訊研究所
研究生
s9830603@cyut.edu.tw

林進發
朝陽科技大學
資訊與通訊研究所
助理教授
jflin@cyut.edu.tw

摘要

由於無線感測網路(Wireless Sensor Networks, WSNs)和太陽能發電技術的蓬勃發展,再加上半導體產業的不斷進步,太陽能電池的光電轉換效率也隨之提升,使得太陽能發電系統的成本也越來越低。因此隨著太陽能電池的效率增加、成本降低與環保意識的高漲,太陽能的使用日漸普遍。無線感測網路通常佈署於偏遠的環境,用於偵測環境數據,並將其傳回資料收集中心(Sink)。由於無線感測節點,是以電池供電,因此節點的運作受能源的限制。本文為了延長無線感測網路的壽命,在無線感測節點中整合了太陽能發電技術,使無線感測節點能夠透過太陽光來適時補充能源,以延長使用壽命期能有永續存活的可能性。

關鍵字：無線感測網路、太陽能發電技術、延長壽命。

Abstract

As wireless sensor network (WSNs), and vigorous development of solar power technology, coupled with the continuous progress of the semiconductor industry, solar cell conversion efficiency are increasing, making the cost of solar power systems increasingly lower. Therefore, the efficiency of solar cells with increased costs and rising environmental awareness, increasingly popular use of solar energy. Wireless sensor networks are usually deployed in a remote environment for detection of environmental data and returns the data collection center (Sink). Since wireless sensor nodes, is battery powered, so the operation of the node by energy restriction. This wireless sensor networks in order to extend the life of wireless sensor nodes in the integration of solar power technology, the wireless sensor

nodes that through the energy of sunlight to timely supplement to extend the service life of the possibility to have sustainable survival.

Keywords: wireless sensor networks、solar power technology、extend life.

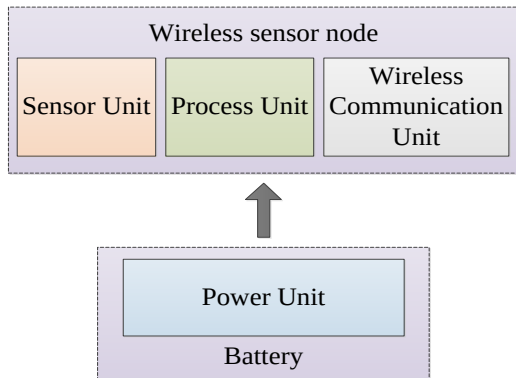
1. 前言

最近幾年,隨著全世界環保意識的高漲,地球溫室效應所造成的自然災害日益嚴重,顯示出潔淨能源以太陽能電池(Solar Cell)的重要性日益提升。目前應用最普遍的太陽能電池分為結晶矽及非晶矽兩大類,其中結晶矽因為技術比較成熟,光電轉換效率約為12%-17%,而非晶矽產品的光電轉換效率則約為8%-13%。太陽能光電轉換是指利用光電轉換元件將太陽能轉化成電能,經由太陽光照射後,將光的能量轉換成電能,此光電元件稱為太陽電池,具有無需燃料、無污染與無噪音等優點。此外太陽能電池根據其形態的不同,又可分為塊狀(Bulk)太陽能電池與薄膜(Thin film)太陽能電池兩大類。塊狀太陽能電池一般指結晶矽太陽能電池;薄膜太陽能電池則包括矽薄膜型、化合物薄膜型與有機染料薄膜型。相較於塊狀太陽能電池,薄膜太陽能電池具有厚度薄(厚度一般在數微米內)、可彎曲且外形和尺寸可隨意變化的特性。

由於綠能技術的發展,利用環境周圍的能源,例如太陽能[1]、風[2]和機械震動[3]等,吸引了許多研究在於使用能源收集技術,以延長電池壽命與更換週期。而其中,太陽能是環境中最為普遍的能源類型,也具有較大的功率密度。因此,應用太陽能提供能源於無線感測網路,將可達到延長感測節點壽命之目的。

無線感測網路與嵌入式系統(Embedded system)快速發展,導致許多的應用,如溫度、壓力、光線、遠程的環境監測與智慧家庭等等。應用無線感測節點感測環境的變化,並分

析所蒐集到的資訊，利用無線通訊的技術將資訊傳回資料收集中心。由於無線感測節點的體積小且數量龐大並以電池驅動，而且常佈署於遠程無人的環境(如農業監測、氣象感測等)，所以節省節點電量[4]成為設計與應用無線感測網路主要的考量。而無線感測網路最主要目的，是利用感測節點收集使用者所需要的資料，並建立路徑回傳資料。但是由於無線感測節點的電源有限，所以提高無線感測網路的壽命與節省能源消耗便顯得十分重要。



圖一、基礎無線感測節點架構

基礎的無線感測節點包含處理單元 (Process Unit)、無線通信單元 (Wireless Communication Unit)、感測單元 (Sensor Unit)、電源單元 (Power Unit)，如圖一所示。處理單元負責處理收集的數據與簡單的運算，無線通信單元負責處理與其他節點通訊的傳送與接收訊息，感測單元則進行環境的監測，電源單元供應整個節點所需的能源。無線感測節點在電池供應電源下，其能源會隨感測節點的運行時間而消耗，直到能源用盡時，則感測節點就無法運作而喪失其功能。因此，本文提出應用太陽能發電技術，在白天時太陽能板利用光能轉換成電能來提供無線感測節點能源，而多餘的能源將可以儲存於儲能元件。到了晚上或光線不足無法提供足夠的能源時，便可使用白天儲存的能源，來供應無線感測節點運作。

本文其餘的組織架構內容如下，第二部份將描述應用能源收集技術於無線感測網路之相關研究。第三部份提出應用太陽能發電技術於無線感測網路之系統架構。實驗與測量分析的結果在第四部份。最後，第五部份為本文的結論。

2. 文獻探討

太陽能無線感測網路已成為重要的研究領域之一，其相關研究可分成硬體設計與相關應用兩大部分，以下將針對此兩部分加以說明。

2.1 硬體設計

在無線感測網路中能源的消耗是一個非常重要的問題，因為無線感測節點通常佈署於遠程無人維護或惡劣的環境，並使用有限能源(如電池)，所以無線感測節點的壽命是取決於電池的電量。利用太陽能電池技術可以補充電池的電量，降低電池的消耗，達到延長壽命的目的。在[5, 6]的研究中，設計具高效率的充電電路，將能源有效率的儲存於儲能元件與供應給負載使用，並利用超級電容 (Super capacitor) 為儲能元件[7]，此元件的電容量比一般電容器高出很多，通常有數百 mF 到數千 mF 之間。而傳統電容器僅有 μF 或 mF 電容量。其儲能特性介於充電電池與傳統電容器之間，擁有高能量與功率密度，超級電容具有優秀的特性，包括：

(1) 充放電速度快：充放電過程可在毫秒 (ms) 內完成，而充電電池充電時間則在小時 (hours) 以上。

(2) 循環壽命高：完全充放電可以超過 50 萬次充放電週期，是普通充電電池的 20 至 200 倍。

(3) 能量密度大：能量密度大於傳統電容器數十至數百倍。

(4) 功率密度大：功率密度高於傳統電池數十至數百倍。

(5) 高可靠性：超級電容器不會出現爆炸、腐蝕等危險情形。

(6) 壽命高：長達 10 年等優點。

透過其研究或成果顯示，超級電容儲存容量低於充電電池，且無法持續數天運作，故只適合做短時間的能源供應，而無法使用在長時間的環境下，所以本論文暫時不考慮使用超級電容，而採用充電電池供電為主，太陽能充電為輔。

2.2 相關應用

無線感測節點利用太陽能之能源補充特性，在[8]的研究中提出太陽能感知路由協定 (Solar-aware Routing Protocols)，由於太陽位置會隨時間而變化，感測節點將選擇具有太陽能

供電之路徑傳送感測數據回資料收集中心。另外在 Energy Harvesting Opportunistic Routing (EHOR)[9]提出利用能源收集裝置，收集環境中的能源(如光、熱等)，使無線感測節點能源依賴於能源收集裝置的能源。但是，由於能源收集率是不穩定的，因為依賴環境的因素，因此 EHOR 必須選擇一個最佳的無線感測節點來轉傳資料到資料收集中心，所以提出將節點分區並分配各區域的傳輸優先順序方式進行路由，同時考慮到靠近資料收集中心的無線感測節點和剩餘能源，一旦節點能源耗盡就必須進入充電狀態，直到能源補充至一定程度，才繼續使用。但隨著節點數的增加，將使網路負載(Overhead)提高，而影響整體網路的運作。EHOR 使用超級電容來儲存能源，利用超級電容極快的充電速度將能源儲存並做短時間的能源供應。此外在[10, 11]的研究中提出在室內環境中應用太陽能板收集室內光線的能源，並使用超級電容來儲存能源，以提供與補充無線感測網路的能源，但是當沒有光線時節點將無法持續運作太長的時間。在[12]研究中，分析各種能源收集技術，例如，熱、光、震動、射頻(RF)功率。並根據各種小型低功率消耗裝置的應用，使用電池或超級電容來儲存能源。

隨著太陽能電池技術的發展與應用，本論文針對能源的補充，提出應用太陽能發電技術於無線感測網路，以達到延長無線感測節點使用壽命之目的。

3. 太陽能充電系統設計與架構

3.1 太陽能板

太陽能板我們使用 Solar Focus[15]的 1SC1 產品，如圖二所示。採用三層複合非晶矽太陽能光電技術，可有效吸收全部的太陽能光。採用分層方式，將太陽能光中的紅、綠、藍等不同波長光譜有效吸收。

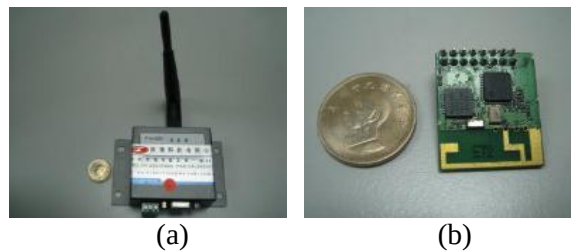


圖二、Solar Focus 1SC1 太陽能板

由於可吸收各種波長的太陽光譜，所以即使在早晨、黃昏或陰天等非理想環境狀況

下，都可以有效轉換出電能。因此比一般太陽能產品可轉換電能的時間長且對環境光線的要求較低。單片太陽能板電力輸出可達 2V 420mA。此太陽能板的優點為重量輕(20g)且防水，在實作上可以串聯或並聯數個太陽能板以符合設備之電力需求。

3.2 無線感測節點



圖三、無線感測節點 (a)IP-Link 2220H (b) IP-Link 1223

無線感測節點採用 IP-Link 2220H[16]，如圖三(a)所示，此無線感測節點具有防水外殼，適合應用於室外環境佈建時使用，其規格詳如表一所示。另外，微型的感測節點 IP-Link 1223[16]，如圖三(b)所示。此感測節點體積小，適合用在所需的微型無線感測器，其規格詳如表二所示。

表一、無線感測節點 IP-Link 2220H 規格

射頻	頻率	2.4 GHz
	最大資料速率	250kbps
	傳輸距離	1200m
功耗	發射/接收	$\leq 205\text{mA}/\leq 50\text{mA}$
工作條件	電源電壓	9 to 30V DC
	工作環境溫度	-20°C to 70°C
	工作環境濕度 (常壓)	10 to 90%

表二、無線感測節點 IP-Link 1223 規格

射頻	頻率	2.4 GHz
	最大資料速率	250kbps
	傳輸距離	100m
功耗	發射/接收	29mA/27mA
	休眠	4uA
工作條件	電源電壓	2.7 to 3.6V DC
	工作環境溫度	-20 to 90°C
	工作環境濕度 (常壓)	10 to 90%

3.3 儲能裝置

表三、鋰電池、鎳氫電池與鎳鎘電池之基本特性比較

電池分類	鋰離子電池(Li-ion)	鎳氫電池(NiMH)	鎳鎘電池(NiCa)
電壓(V)	3.75	1.2	1.2
壽命(Cycles)	1000	800	800
記憶效應	無	輕微	大
重量比能量密度(Wh/Kg)	135	80	55
體積比能量密度(Wh/L)	335	300	180
環境影響	無	無	重金屬鉛汙染

電池容量以毫安培/小時(mA/h)為單位，如果標示為 1020 mAh，即表示以 510mA 可持續放電約二小時，例如以 50mA 則可持續放電約二十小時，以此類推。目前充電電池的大概分類與其優缺點，如表三所示，鋰電池是擁有最多優點的充電電池，具有壽命高、無記憶效應與能量密度高等優點，其次是鎳氫電池。因此我們主要使用鋰離子電池與鎳氫電池，來做為儲能元件。

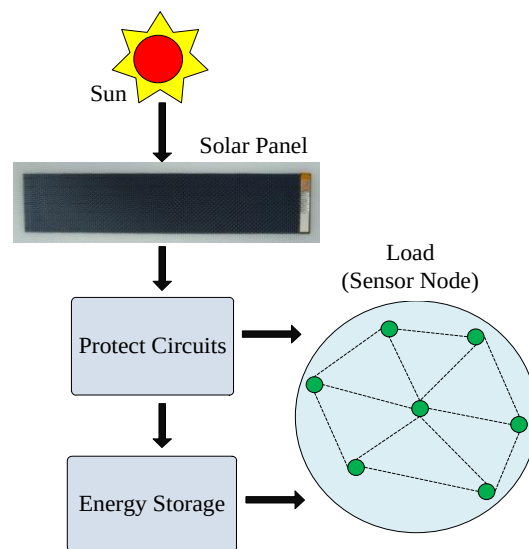
由於無線感測節點 IP-Link 2220H 與 IP-Link 1223，所需的能源規格不同，所以在 IP-Link 2220H 無線感測節點使用 Nickel-Metal Hydride(鎳氫電池)充電電池(9V 300mAh) 來當儲能元件；在無線感測節點 IP-Link1223 使用 Li-ion(鋰離子電池)充電電池(3.7V 1020mAh) 來當儲能元件，如圖四所示。



圖四、儲能裝置(a) Nickel-Metal Hydride (b) Li-ion

3.4 太陽能系統架構

利用太陽能板將太陽光能轉換為電能再經由保護電路(Protect Circuits)將電能提供給負載感測節點(Sensor Node)或儲能元件(Energy Storage)，當太陽能不足以提供無線感測節點所需電能時，可以經由儲能元件來提供電能，以達到持續供電的目的，其架構如圖五所示。太陽能板在戶外接收陽光，並轉換為電能經由保護電路將電能提供給無線感測節點或將電能儲存在儲能元件中。

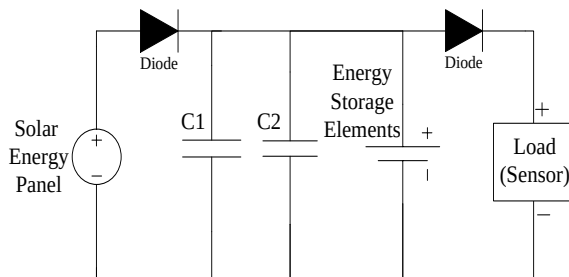


圖五、太陽能充電系統架構圖

4.系統實作與分析

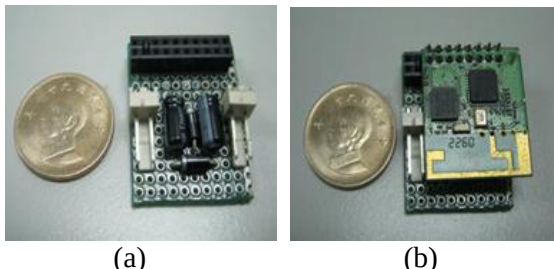
4.1 系統實作

使用太陽能充電系統，提供能源給無線感測節點，而多餘的能源將儲存於能源儲存元件(Energy Storage Elements)中，簡單的太陽能充電控制電路，如圖六所示。二極體(Diode)負責保護太陽能版，避免供應電壓過低，發生儲能元件產生逆流的現象破壞太陽能版；電容(C)則負責穩定太陽能的電壓與儲能。因為太陽能供應的電壓電流和功率有限，而通常電子零件都是負載元件，而負載電子元件越多對太陽能電池的供應效率越低，所以盡量減少多餘複雜的電路，提出以簡單方便的電路來進行充電，避免因太多的電子元件，造成太多負載而浪費額外的能源。



圖六、太陽能系統充電控制電路圖

實作完成的充電控制電路板，如圖七(a)所示，圖中有一個針腳母座與二個腳座為無線感測節點、太陽能板與儲能元件的插座位置。使用於無線感測節點 IP-Link 1223，以控制充電電壓與輸出電壓，如圖七(b)所示。



圖七、(a)充電控制電路板 (b)無線感測節點與充電保護電路板

4.2 測量與分析結果

太陽能板在陰天或晴天的環境，還有陽光照射的角度都會影響所產生的電流大小，因為太陽輻射的強度會隨時間或氣候而隨時改變，因此電流大小會因不同太陽輻射強度，導致所產生的電流大小不同的情況。

在實際測量下，由於在晴天和陰天，陽光所照射的輻射強度有所差異，因此太陽能板所吸收的能量也會不同，例如在晴天陽光直接照射下的中午時間電流值最大約為 235mA，而在傍晚時間電流值最大約為 80mA。陰天時，在中午時間電流最大值約為 35mA，傍晚時間所量測值最小約為 15mA。並進行感測節點壽命測量與加入太陽能充電後的電壓變化測量。並計算其電池壽命與充電效率 [13][14]，如下：

$$\text{電池壽命} = \frac{\text{電池電壓}(V) \times \text{電池總容量}(mA/h)}{\text{輸出電壓}(V) \times \text{消耗電流}(mA)} \quad (1)$$

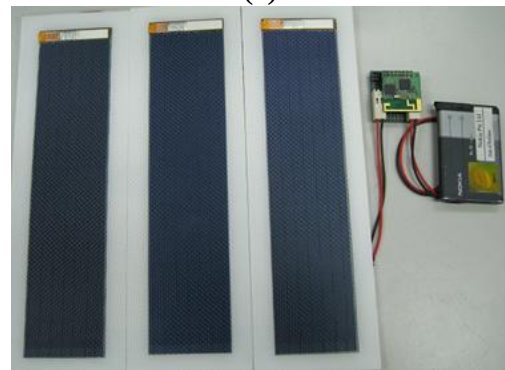
$$\text{充電效率} = \frac{\text{消耗電流}(mA) \times \text{電池壽命}(h)}{\text{充電電流}(mA) \times \text{充電時間}(h)} \times 100\% \quad (2)$$

其中，電池壽命為電池電容量完全消耗的時間，使用電池總功率/小時(W/h)除以消耗功率計算出可以使用的時間。充電效率為計算電池所儲存的能源效率，利用總消耗電流再除以總充入電流計算出充電的效率。

4.2.1 IP-Link 1223 測量與分析



(a)



(b)

圖八、IP-Link 1223 (a)室內無使用太陽能充電系統與(b)戶外使用太陽能充電之系統

以下將針對 IP-Link 1223 在室內無使用太陽能充電與戶外使用太陽能充電環境下，實際量測與分析太陽能充電之效率，裝置如圖八所示。

(1)室內：測量無使用太陽能充電之運作時間。使用 Li-ion 電池做為電源，以感測節點規格發射的消耗為 29mA，接收為 27mA。在 29mA 左右的總消耗電流，以 1020mAh 電池容量，由公式(1)計算，約可運作 35 小時。並進行實際測量 Li-ion 電池的電壓狀況如表四所示，測量運作中的 IP-Link 1223 (每秒傳送接收一次指令與感測的溫度)電壓變化，電池初始電壓為 4.1V。結果顯示無線感測節點運作時間約 30 小時，由於 Li-ion 電池額定電壓為 3.7V，到達完全充飽電壓為 4.2V，我們使用之 Li-ion 電池電壓為 4.1V，所以與計算完全充飽電運作約 35 小時，時間相差約 5 小時，

主要是因為我們使用之電池未達到完全充飽電壓 4.2V，因此測量與計算的運作時數略有差異。

表四、IP-Link 1223 電壓變化(室內 26°C)

經過時間	電池電壓
5 小時	4.02V
10 小時	3.95V
15 小時	3.82V
20 小時	3.72V
25 小時	3.6V
30 小時	2.6V

表五、IP-Link 1223 在戶外充電情況

時間	電池電壓	充入電流
11:00	3.00V	230mA
12:00	3.70V	235mA
13:00	3.78V	235mA
14:00	3.78V	210mA
16:00	3.80V	80mA

(2)戶外太陽光下(約 70000 流明)：使用 IP-Link 1223 與 1SC1 太陽能板對 Li-ion 電池進行充電。並利用三片太陽能板串聯，使其電壓增加，電壓與電流變為 6V 420mA。測量結果，產生電力為 5.8V-6.4V 80mA-235mA。如表五所示，測量運作中的 IP-Link 1223 (每秒傳送接收一次指令與感測的溫度)在戶外環境下的充電情況。測量結果，從 11:00 點至 16:00 點，電壓由 3V 充電到 3.8V，約可增加無線感測節點延長使用 10 小時左右。

充電效率的計算，以消耗電流 29mA、電池壽命 35 小時、充電電流平均 200mA 在每日的平均日照時數約 5 小時下，由公式(2)計算，充電效率約為 98%。因此，在每日平均日照時數 5 小時，理論上可以達到 98%充電效率。

4.2.2 IP-Link 2220H 測量與分析



(a)



(b)

圖九、IP-Link 2220H (a)室內無使用太陽能充電系統與(b)戶外使用太陽能充電之系統

以下將針對 IP-Link 2220H 在室內無太陽能充電與戶外使用太陽能充電環境下，實際量測與分析太陽能充電之效率，裝置如圖九所示。

(1)室內：測量無太陽能充電之運作時間。使用 Nickel-Metal Hydride 電池做為電源，以感測節點規格發射的消耗為 $\leq 205\text{mA}$ ；接收為 $\leq 50\text{mA}$ 。實際測量運作在室內環境約 45mA~60mA 左右的總功率消耗，以電池容量 300mAh，經由公式(1)計算，約可運作 5 小時。並進行實際測量 Nickel-Metal Hydride 電池的電壓狀況，如表六所示，測量運作中的 IP-Link 2220H (每秒傳送接收一次指令與感測的訊號強度)電壓變化，初始電壓為 9.2V。測量結果可持續使用 5 小時，所以測量與計算的時數剛好符合。

表六、IP-Link 2220H 電壓變化(室內 26°C)

經過時間	電池電壓
1 小時	8.5V
3 小時	8.4V
4 小時	8.2V
5 小時	7.6V

表七、IP-Link 2220H 在戶外充電情況

時間	電池電壓	充入電流
11:00	7.30V	230mA
12:00	8.80V	235mA
13:00	9.80V	235mA
14:00	9.80V	210mA
16:00	9.80V	80mA

(2)戶外陽光下(約 70000 流明):使用 1SC1 太陽能板對 Nickel-Metal Hydride 電池進行充電。並將六片太陽能板串聯,使其電壓增加,電壓與電流變為 12V 420mA。如表七所示,測量運作中的 IP-Link 2220H (每秒傳送接收一次指令與感測的訊號強度)在戶外環境下的充電情況。測量結果,由於電池容量為 300mAh 所以充電經過 2 小時,電壓就已經趨近飽和狀態。

充電效率的計算,例如以消耗電流 60mA、電池壽命 5 小時、充電電流平均 200mA 在每日平均日照時數約 5 小時下,由公式(2)計算,以每日平均 5 小時日照,理論上只需 2 小時,即可達 100%的充電效率。

測量結果顯示,在陽光直接照射太陽能板下,可以有效儲存能源與提供能源給無線感測節點,延長運作時間。然而,為了使無線感測節點能在連續好幾天的惡劣環境中持續運作,可以再並聯太陽能板增加充電能量與增加儲能元件的容量,以提升太陽能充電速度與能量,使無線感測節點可以在連續性的惡劣環境中達到永續存活。

5. 結論

太陽能相關技術應用於無線感測節點,是一項重要的研究,由於太陽能非常適合於提供小型無線設備能源與補充電池能源,以達到延長壽命或無限壽命之目的。本論文提出設計與實作太陽能無線感測節點,最後測量分析結果顯示,太陽能是可以有效的提供無線感測節點所需能源與儲存能源於儲能元件中。

由於目前使用無線感測節點之單晶片微電腦(Single-chip microcomputer)時脈震盪頻率高,且無法調整其震盪頻率與運作模式,導致感測節點完全處於接收模式,所以消耗功率無法降低,因此在連續惡劣的氣候環境下(如雨天或陰天)節點有可能死亡。本論文,未來將使用超低功率感測節點(Ultra-Low Power Sensor),具低震盪頻率及可調整運作模式,降低功率消耗,將有可能達到無限壽命的可能性。

參考文獻

[1] J. W. Kimball, B. T. Kuhn, R. S. Balog, "A System Design Approach for Unattended Solar Energy Harvesting Supply" *Journal of*

IEEE Transactions On Power Electronics, Vol. 24, No. 4, pp. 952-962, April 2009.

- [2] M. A. Weimer, T. S. Paing, R. A. Zane "Remote area wind energy harvesting for low-power autonomous sensors" *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, pp. 1-5, 2006.
- [3] R. N. Torah, M. J. Tudor, K. Patel, I. N. Garcia, S. P. Beeby, "Autonomous low power microsystem powered by vibration energy harvesting" *IEEE Conference on Sensors*, pp. 264-267, 2007.
- [4] G. Anastasi, M. Conti, M. D. Francesco, A. Passarella, "Energy conservation in wireless sensor networks: a survey" *Journal of Ad Hoc Networks*, Vol. 7, No. 3, pp. 537-568, May 2009.
- [5] F. I. Simjee, P. H. Chou, "Efficient Charging of Supercapacitors for Extended Lifetime of Wireless Sensor Nodes" *Journal of IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 23, No. 3, pp. 1526-1536, May 2008.
- [6] N. J. Zhao, W. Q. Liu "Study of the charging circuit of a pulsed solid-state laser power supply: A new concept of high charging efficiency and realization" *Journal of Optics & Laser Technology*, Vol. 41, No. 4, pp. 461-469, June 2009.
- [7] M. Mufti, S. A. Lone, S. J. Iqbal, M. Ahmad, M. Ismail, "Super-capacitor based energy storage system for improved load frequency control" *Journal of Electric Power Systems Research*, Vol. 79, No. 1, pp. 226-233, January 2009.
- [8] T. Voigt, H. Ritter, J. Schiller, "Utilizing Solar Power in Wireless Sensor Networks" *IEEE International Conference on Local Computer Networks*, pp. 416-422, 2003.
- [9] Z. A. Eu, H. P. Tan, Winston K.G. Seah, "Opportunistic routing in wireless sensor networks powered by ambient energy harvesting" *Journal of Computer Networks*, Vol. 54, No. 17, pp. 2943-2966, Dec 2010.
- [10] W. S. Wang, T. O'Donnell, L. Ribetto, B. O'Flynn, M. Hayes, C. O'Mathuna, "Energy harvesting embedded wireless sensor system for building environment applications" *International Conference on Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology*, 1st, pp. 36-41, 2009.

- [11] A. Hande, T. Polk, W. Walker, D. Bhatia "Indoor solar energy harvesting for sensor network router nodes" ***Journal of Microprocessors and Microsystems***, Vol. 31, No. 6, pp. 420-432, September 2007.
- [12] R. J. M. Vullers, R. van Schaijk, I. Doms, C. Van Hoof, R. Mertens, "Micropower energy harvesting" ***Journal of Solid-State Electronics***, Vol. 53, No. 7, pp. 684-693, July 2009.
- [13] K. S. Ng, C. S. Moo, Y. P. Chen, Y. C. Hsieh "Enhanced coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries" ***Journal of Applied Energy***, Vol. 86, No. 9, pp. 1506-1511, September 2009.
- [14] T. L. Gibson, Nelson A. Kelly "Solar photovoltaic charging of lithium-ion batteries" ***Journal of Power Sources***, Vol. 195, No. 12, pp. 3928-3932, June 2010.
- [15] Solar Focus, <http://www.solarmio.com> °
- [16] 高儀科技公司, <http://www.hi-tek.com.tw> °