

國科會智慧電子國家型科技計畫

免電池無線按扣壓電獵能開關

Batteryless Wireless Pushbutton Piezoelectric Energy Harvesting Switches

目的與重要性

開關是任何和電有關之電子產品重要之一，遍及所有的電器；在大的空間裡，常需要事前佈線規劃開關之設置位置，在使用中，人需要親自走到開關附近以控制某電器。在遙控器出現後，大幅降低此不便性，但仍有更換電池之需要，因此提出一新型隨處可安裝、隨處可用之 wireless self-powered batteryless multi-channel switch。在任意空間裡，增加開關之佈置便利性，無需事前佈線規劃以及實際之電線佈線線路；Self-power 利用開關“控制”時之按扣外力即產生自我供電的能量，並且永遠無須更換電池，完全沒有任何之維修成本。有廣大的商業應用以取代現有不便之開關，例如：建築物內之電控鐵捲門、居家之照明開關或給風散控制、無法嵌入開關或需事後配置之開關、任何實際有線線路不易佈建或是耗費高成本之處而需要有控制介面。

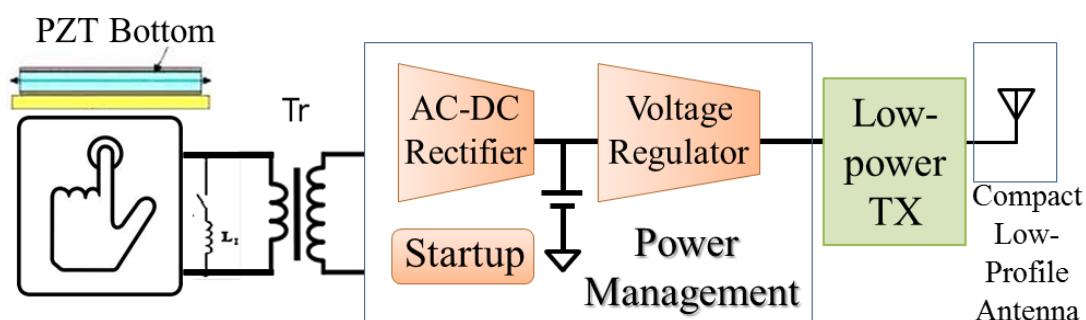
開關的數量在日常生活中是十分顯見的，小至辦公室約十多個開關，大到機關單位的建築物約數百至上千個(例如：學校教學大樓、政府機關)；在戶外的公共空間，常是數百數千個(例如：車站、機場)，依其額度有不同之功能，但對方便性與可靠性之需求是一致的。原固定式單一控制之開關轉移至可移動式、多通道之使用方式，將是一大突破與創新，其規模也是相當之鉅大，在無線通話、無線傳能之後、未來“無線控制”的需求也將快速之成長。本計畫不但提出新穎之控制方式，更結合新興獵能技術，符合綠色環保之永續能源將會是未來電子商品或器材之重要供電方向。

將電子產品之傳統開關轉換成“無線按扣式”，利用按扣瞬間產生所需之能量，可實現新一代之無線控制開關；具有無線式(wireless)，自給供電(self-powered)，免電池(batteryless)，多通道(multi-channel)特點之開關。Self-power 利用開關“控制”時之外力即產生自我供電的能量。並在開關瞬間發送此控制器之無線信號，隨後“通電”其他遠端裝置。藉此發送信號，激活其他耗能的設置/設施(燈光，空調，TV等)。藉由 Battery-less design: 無須更換電池，完全沒有任何之維修成本，無論是一次性電池或多次可充電之電池，皆已造成地球上過多之廢棄電池，而污染環境，採用無電池之開關技術是新一代綠能、環保裝置之關鍵技術。其中主要使用獵能技術(Energy harvesting)，利用“控制開關”時之外力來擷取所需之能量，並提供自身所有電子系統之電源供應(Self-power)，即產生自我供電的能量。產生的方式包括以振動轉電能之型式，主要有兩類：壓電式或磁電式，本計畫以壓電振能為主。然而現有技術少有直接將 self-power 之電子系統做遠距離之無線收發，此為本計畫之挑戰之一；另一面，傳統之獵能主要為連

續式，在特定之頻率下(通常為 resonant frequency)達到最佳之輸出功率，而開關無法以連續式提供所需之輸入能量形態，因此，突發式(Burst mode)獵能技術為本計畫的重點之一。本按扣式獵能電路，為新型之獵能形態，需在極短時間內有效擷取、轉換、儲存能量，並供給給超低功耗之發射端，透過微天線傳送控制信號至十公尺範圍內之接收器，同時也必須具備超低功耗之前端電路。除了產生能量驅動一組控制信號，並能區分多重之不同控制命令(一對多通道)。最後需要考慮其微小化以便於應用於各樣情境：在有限之空間內需克服壓電式/磁電式之能量源(Piezoelectric device)體積之限制。在收發電路部分，主要的尺寸限制將來自天線，同時其天線增益和效率將影響傳送之距離和接收機靈敏度之規格。本計畫將整合電子電路、微電機控制、能量轉換、RFIC、電力電子、微波天線等跨領域之技術，協助使用者方便地開關控制多重信號，並充份運用台灣 ICT 產業與網路設施完善之優勢，以達到新一代綠色無線控制，提高居家生活之便利。

本計畫採用之研究方法

本子計畫主要為免電池無線按扣發射端利用壓電振動方式獵能，並含天線形成一完整之封裝開關系統，其系統架構如圖一，包括能量源之擷取部分、能量轉換與儲能供電、收發之天線等部分。



圖一. 免電池無線按扣壓電獵能開關之系統架構圖

壓電獵能電路

此電路另個重要之挑戰為需在短暫之按壓時間內可以啟動(start-up)，並開始輸出能量；而其轉換效率是最關鍵之效能參數。此效率主要受數個可能之損耗來源，包括 Conduction Losses，開關損耗，靜偏流損耗、負載耗損等[Priya 2010]。由於半導體開關之緣故，要先使其能在低電壓下(< 400 mV)能啟動，現有之比較表如表一。由於其低啟動之電壓，故充電之時間相對較長，相對於按壓之有限時間，將無法有其有效之按壓瞬間將控制信號送出，因此，此啟動電路之主要限制會是在其啟動 settling time。目前在短 settling time 時間內可啟動為[Chen-2011]，但其頻率較高，並不適合人體按壓開關之頻率，在此低頻下，電路轉換效率會大幅下降，因此需要朝較高之啟動電壓下，以縮小啟動電路之 settling time。其後需要一 bandgap reference voltage 產生電路，使其內部有一參考源。在順利啟動之

後，將經由 pulse width modulation (PWM) or pulse frequency modulation (PFM) 方式進行控制，以降壓型(buck)切換式轉換電路輸出供應電源給後級電路使用(儲存後成發射模組之供電)。

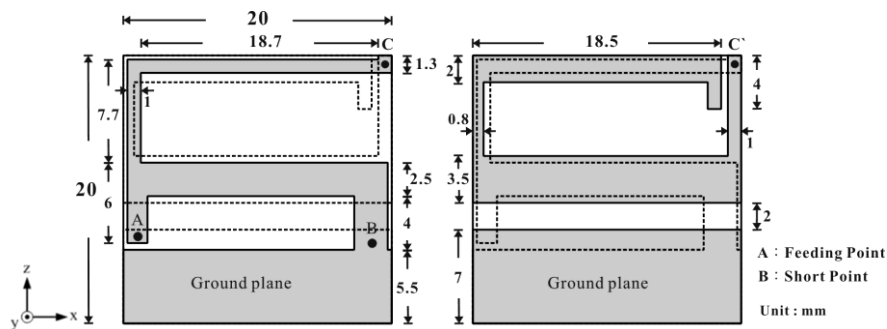
EH Converter IC	JSSC [Carlson 2010]	ISPSDI [Matsumoto 2009]	ICICC [Chen 2010]	JSSC [Chen 2012]	This Project
Startup Mechanism	External Voltage	Charge Pump	Charge Pump	Capacitor Pass-on	MEMS Transformer & Cap. Accumulate
Process	130 nm	350nm SOI-BCD	65 nm CMOS	65 nm CMOS	180 nm CMOS
Source Type	Continuous	Continuou s	Continuous	Continuous	One Shot
Min. Startup Voltage (mV)	650	360	180	95	100
Power Supply Remaining Time (ms)	N/A	N/A	N/A	N/A	20

表一.啟動電壓比較

微型低剖面(Low-Profile)天線

此無線開關系統考慮其方便使用公開頻帶以及適當之長距傳輸，設定在 433 MHz 之 ISM band，其全波長在空氣中約為 70 公分，並不容易直接實現在微型之開關尺寸上，需要有合適之微型天線設計。同時，天線必需是服貼於控制開關之平面上而非突出之單極天線，因此，以低剖面(Low-Profile)天線為主要設計之需求方向。並且，在頻寬上之需求雖不如高速通訊要求寬頻，然而考慮到不用可攜式移動環境變異造成頻率偏移，會使系統無線傳輸效率下降，因此需有適當之寬頻設計；最後，由於整體低功耗之發射機發射之低輸出功率，因此需要高效率之天線設計。首先，常見寬頻微型天線常以 planar inverted-F antenna (PIFA)之設計方式縮小體積 (圖二) [Huang 2013]。其設計將 Ground 反折到基板的另一面，使除了縮小輻射體之外，同時整體面積(含 Ground)同時縮小為 320 mm^3 ($0.0266\lambda_0 \times 0.0266\lambda_0 \times 0.00106\lambda_0 \text{ mm}^3$) (使用 FR4 基板)，且為單層之設計，實現容易且低成本。然而在對折且薄板之下，

當造成輻射效率與天線增益下降，因此仍需要避免此類表面電流抵銷之不良影響。



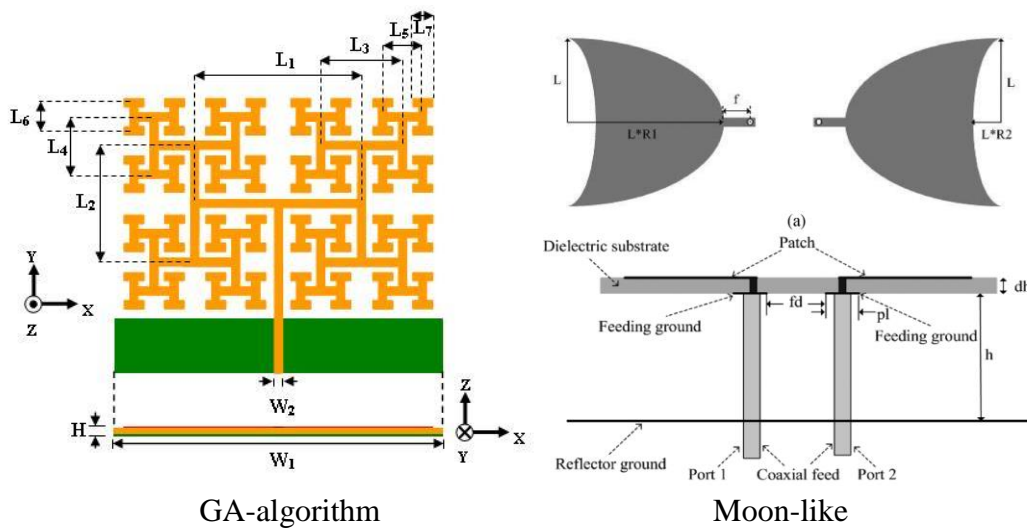
圖二.採用 planar inverted-F antenna (PIFA) 之設計方式縮小體積。

除了天線的縮小化，同時寬頻化設計可減少頻偏之影響，此系統操作在 433 MHz ISM band 下，而這樣的低頻段操作對天線設計來說將會是非常大的挑戰；本子計畫將探討並實現天線的縮小化設計以及寬頻化之設計。以往大部份設計操作在 433 ISM 頻帶的微型天線，為了縮小天線整體體積，除了將天線輻射體環繞在物體的表面以延長電流路徑長度外，還必須採用高介電系數的微波基板當作材質，製成成立體結構的堆疊天線，來達到目標操作 ISM 頻帶；但如此高品質因素(Q)的情況下，卻也犧牲了天線頻寬。文獻[Pichitpong 2004] [Kim 2004][Lee 2007]使用倒 F 式微帶線饋入，雖然在天線共振 ISM 頻帶的主要輻射體路徑上，以漸層改變輻射體寬度的方式，加入了能增加頻寬的 semi spiral antenna 想法與設計，但對於頻寬的表現仍然相當不顯著；如文獻[Pichitpong 2004]中，使用一修改型輻射體往內延伸環繞的倒 F 形(PIFA)堆疊天線，頻寬約可達到 390 ~ 410 MHz 約 4.8%的頻寬，以及文獻[Kim 2004]中，同樣使用 PIFA 饋入以及 spiral 的輻射體設計，配合兩層高介電材質的堆疊天線，頻寬約可達到 390 ~ 425 MHz 約 8.5%的頻寬；但在近期的天線設計，文獻[Lee 2007]中同樣使用了 PIFA 的天線饋入型式，並將堆疊天線的各層介電材質設計成不同的環型輻射體，藉由這樣的天線結構，可大幅提升頻寬達到 375 ~ 425 MHz 約 12.5%的頻寬；由以上文獻可得知，若想要增寬高介電材質堆疊天線的操作頻寬，勢必得從每一層的微波基板進行天線設計，這是我們所不願見到的。

除了堆疊天線立體結構複雜度之外，必須考慮到無線開始在各角度均能接收，因此堆疊天線將不適合此需求，我們傾向在開關的外圍設計寬頻天線，把主要空間留給系統電路；在文獻[Abadia 2009]中我們可以得知，使用 PIFA 型式並將輻射體延長環繞物體表面的天線設計，也只能達成 0.75%的頻寬，所以我們必須重新設計新型的環繞式天線，不再使用傳統天線的 PIFA 窄頻天線，在另一方面，也由文獻[Abadia 2009]中得知，若使天線在被人體損耗性介質包覆後，頻寬將由 0.75%增寬到 55.68%，但增加損耗來提升天線頻寬將使增益降低，這是不利於系統效能的，我們仍然必須使用高介電系數的微波基板，並探討如何設計寬頻的環

繞式天線。

在現今操作在 ISM 頻帶的寬頻化天線設計，從以往到現今的文獻，尚未有人提出完整的成果；是故應用在 ISM 頻帶的天線寬頻化設計，我們會以在低頻帶有寬頻效果、頻帶距離 400 MHz 頻帶最接近、發展已相當成熟的通訊天線做為參考；而針對我們所需求的寬頻環繞式天線，提出了兩篇環狀天線(Loop Antenna)應用於行動手機(mobile phone)的文獻[Wong 2007][Wong 2008]，主要設計是利用由接地面延伸的彎折環狀天線輻射體，作為低頻共振(fundamental mode)的主要電流路徑，並適當設計此環狀輻射體寬度與長度，就可提供寬頻天線所需的電感性，再搭配上饋入段對此環狀輻射體適當的耦合電容，就可達成良好的寬頻阻抗匹配，如文獻[Wong 2007]所示，以一單極天線金屬微片耦合金屬環圈輻射體，達成低頻 810 ~ 1180 MHz 共 37%的頻寬，和文獻[Wong 2008]所示以轉折的饋入線段，耦合環繞微波基板的金屬環圈輻射體，可達成低頻 700 ~ 1010 MHz 共 36.2%的頻寬；利用這樣的天線設計，我們可以將 loop antenna 的輻射體環繞在胃鏡膠囊表面，透過適當的耦合饋入段設計，而達成寬頻。除了 PIFA 和 Loop 型態外，本子計畫亦研究其他更前瞻之微型結構，例如：碎形[Yang 2013](適合微小化)、眼型[Tsai 2012](適合寬頻)、半月型等[Guo 2011] (適合寬頻)，如下圖三所示。並可利用 slot 之控制，調整其饋入網路而提升天線操作頻寬[Wu 2012]。



圖三.微型化天線與寬頻之天線結構

預期完成規格

Sub-Project Interface	Function Block	Symbol	Brief Description	Value	Unit
1	Piezoelectric Patch	A_{pz}	Area	20×100	mm ²
	Piezoelectric Energy Harvester	V_{su}	Start-Up Voltage	< 100	mV
		t_{su}	Start-Up Time	5 ~ 10	ms
		t_{el}	Power Delivery Elapsed Time	5 ~ 20	ms
		P_{dlv}	Delivered Power	10	mW
	η_c	Power Conversion Efficiency	40 ~ 70	%	
1 and 2	Sub-Project Interface 1	V_{DD1}	Supply Voltage	1.0 ~ 1.8	V
2 and 1	Sub-Project Interface 2	P_T	Peak Transmitted Power	-10	dBm
1	T _x Antenna	A_{ATx}	Area	< 20×100	mm ²
		G_{ATx}	Power Gain	-5 ~ 0.5	dBi
	d_{com}	Communication Range	< 10	m	
	R _x Antenna	A_{ARx}	Area	< 50×50	mm ²
		G_{ARx}	Power Gain	-2 ~ 1.5	dBi
1 and 2	Sub-Project Interface 3	S_r	Receiver Sensitivity	> -60	dBm