

寬頻高隔離度雙極化基地台天線陣列設計

Broadband High-isolation Dual-polarized Base Station Antenna Array Design

陳偉吉 王榕穎 郭李瑞 林泰宏
Wei-Ji Chen, Joseph Poujiong Wang, Li-Ruei Kuo, Tai-Hung Lin

中文摘要

本論文針對大型基地台天線中的雙極化共振子提出一種平面式架構，利用金屬柱連通交叉偶極天線雙臂及反射板，改善低頻段阻抗匹配不佳之情況，進而提升共振子操作頻寬。接著我們將共振子初步整合成陣列並探討其表現，由於天線陣列本身需符合高隔離度、高前後比等規範，因此在設定間距排列為天線陣列後，我們進一步著手改善其波束前後比與雙埠隔離度。首先藉由反射板塑型結構減少背向輻射場量，提升天線之波束前後比。之後於天線陣列結構加入倒L形解耦器與負載調整導向器來降低透過反射板耦合至鄰近共振子上之表面電流，改善天線陣列之雙埠隔離度，在輻射體與解耦架構整合後，陣列本身仍可維持寬頻、雙極化、高輻射效率等特點。最後我們所設計完成的實驗原型，可使得天線陣列涵蓋2600MHz~3800MHz操作頻寬，雙埠隔離度達30dB以上，而波束前後比則可大於25dB。

Abstract

A planar broadband dual-polarized antenna element for base station applications is proposed. In order to enhance the impedance matching at lower frequency band, there are metal cylinders electrically connected to the crossed dipole arms and the reflector, respectively. In addition, we have integrated the structure into array and discussed the performance. The antenna array is required to perform high isolation and high front-to-back ratio. After arranging four antenna elements with a distance, we have tried to improve the front-to-back ratio and port-to-port isolation. First of all, by using beamforming reflector design for back lobe suppression, the front-to-back ratio can be improved. Moreover, inverted-L isolators and top-loading tuning director are inserted into antenna array structure, so that the coupled surface current on the reflector can be reduced and the port-to-port isolation can be improved. Finally, the antenna array integrated with the director and isolators still performs wide band, dual-polarized and high radiation efficiency. The proposed antenna array shows that wide operating bandwidth can be generated successfully to easily cover 2600MHz~3800MHz operating bands. Port-to-port isolation is better than 30dB and front-to-back ratio is better than 25dB.

關鍵詞(Key Words)

天線陣列 (Antenna array)
基地台 (Base station)
雙極化 (Dual-polarization)
雙埠隔離度 (Port-to-port isolation)
前後比 (Front-to-back ratio)

1 · 前言

由於智慧型手持裝置的普及，行動上網的人口數與裝置數量急劇攀升，眾多的應用與高解析度的影音傳輸，使得無線數據資料傳輸量呈現指數趨勢的成長。面對無線資料傳輸的龐大需求，也使得電信業者/營運商過去的基地台佈建策略必須有所調整，從語音傳輸時代的涵蓋範圍優先，到必須兼顧個別用戶傳輸速度與系統總容量的新指標。基地台所發射無線電波的涵蓋範圍縮小化並佈建更多的大小基地台是最有效提升總系統容量的方法，但是新站址取得不易以及基地台數量大增，將使營運及維護成本大過收益等現實考量，也會使得基地台數量的擴展有其極限，因此必須同時提升基地台天線的頻寬與多天線整合性能來因應系統共構與流量的需求。此外，LTE世代頻帶眾多且頻率範圍散布廣，射頻與天線系統都需逐漸發展成寬頻/多頻的規格以使佈建與使用更有彈性，因此滿足寬頻/多頻/多波束等規格之高階基地台天線將成為未來幾年4G市場發展的重點。

根據國際電信聯盟(International Telecommunication Union, ITU)[1]的預測，到2020年全球移動互聯網的資料傳輸量，將會增長44倍，與之對應的是，需要至少1340MHz頻譜，相比現在，缺口在500MHz以上。在3.5GHz頻段，國際電信聯盟已經定義了Band42(3400MHz~3600MHz) 和 Band43(3600MHz~3800MHz)的400MHz作為LTE的專用頻譜。幾乎再也找不到其他頻段，還能有如此豐富的頻譜資源，來滿足日益增長的流量需求。加上這部分頻譜價格相對便宜，投入產出比高，使得營運商們紛紛開始將目光投向3.5GHz頻譜。

2014年12月19日，日本總務省正式發放了3.5GHz牌照，授予NTT DoCoMo、軟體銀行(SoftBank)和KDDI三家領先的移動營運商各40MHz頻譜，全部採用TD-LTE(Time-Division Duplex Long Term Evolution)的方式建設。3.5GHz TD-LTE網絡的建設將在日本全面展開，三大營運商將陸續投入商用。3.5GHz TD-LTE有著相當優秀的產業基礎，目前全球發

放的TD-LTE牌照超過800張，其中55%以上為3.5GHz頻譜牌照。全球領先的營運商超過50%擁有3.5GHz頻譜，其中不乏Vodafone、西班牙電信、Orange、MTN等跨國營運商。

而3.5GHz頻譜的應用，也存在著多元化的發展方向。一是用於傳統的移動通信，在話務繁忙、流量壓力較大的場所，通過部署3.5GHz的行動網路，提供更多的網路容量，提升終端用戶的使用感受，確保4G用戶在較高的話務壓力下仍能有較好的體驗。日本此次發放3.5GHz牌照，就是此類用途，NTT DoCoMo、軟體銀行和KDDI的3.5GHz網路都將用於提升行動網路的熱點區域容量，為各家的4G網路提供更多的容量，更高的峰值速率，為最終用戶提供更好的體驗。

二是作為家庭寬頻接入，在那些地廣人稀或者基礎設施相對落後的國家，鋪設光纖既不經濟且也很困難，而採用3.5GHz提供無線寬頻接入，能夠實現良好的投資收益比。基於3.5GHz的「寬頻無線化」，已經成為加拿大Bell、菲律賓Smart等多國領先營運商的選擇，為數以千萬計的家庭用戶提供著寬頻接入。因此為了滿足LTE新興頻帶之需求，我們將開發整合至3.5GHz頻帶之天線陣列共振子，此共振子必須同時具備兩個垂直正交極化，以提供具備極化分集功能之兩個輸出/入埠。

2 · 相關研究

一個具體做法為使用傳統交叉偶極天線(cross-dipole antenna)結構，此類結構具有優異之輻射特性，相當適用於基地台天線之技術發展。圖1為典型的平面式雙極化共振子[2]，此類型天線技術特點為平面印刷電路架構，需以機械支撐基板，使之置於反射板之上。欲饋入能量則需針對正負45度兩組印刷式天線，以電纜焊接在末端近重合中心處。此類型天線原理為水平極化之偶極天線，若饋入側施以反射板，在操作頻帶內具有良好之輻射特性。

然而，典型偶極天線為一窄頻共振子，若欲拓展頻寬，常見以耦合饋入設計替代直接饋入，或者是改變天線形狀等方式。圖2為寬頻雙極化共振子之一實施例[3]，其要點在於先改變

天線形狀調整阻抗之匹配，頻寬可從35%增加到54%，此時再於饋入側的基板上鋪設印刷金屬(tuning plate)，可進一步增加天線單元的共振點，頻寬提升至79%。比較圖1和圖2，在改變天線結構後，電壓駐波比(Voltage Standing Wave Ratio, VSWR)曲線變化趨勢將會更加平緩，阻抗頻寬隨之增加。

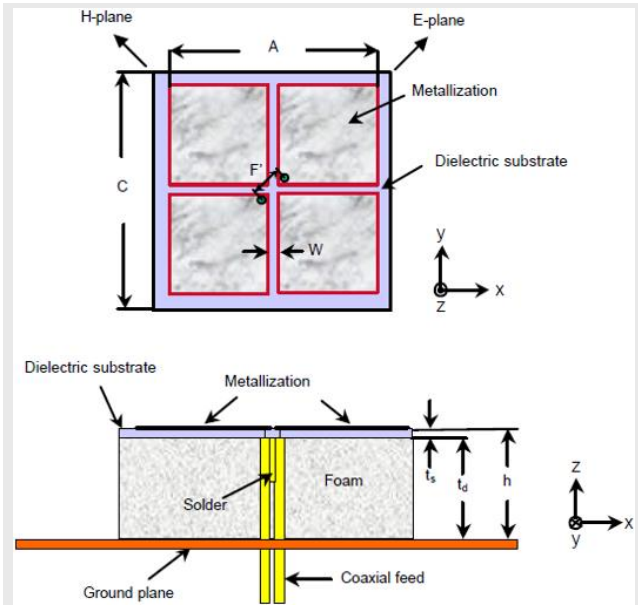


圖 1 傳統平面式雙極化共振子結構

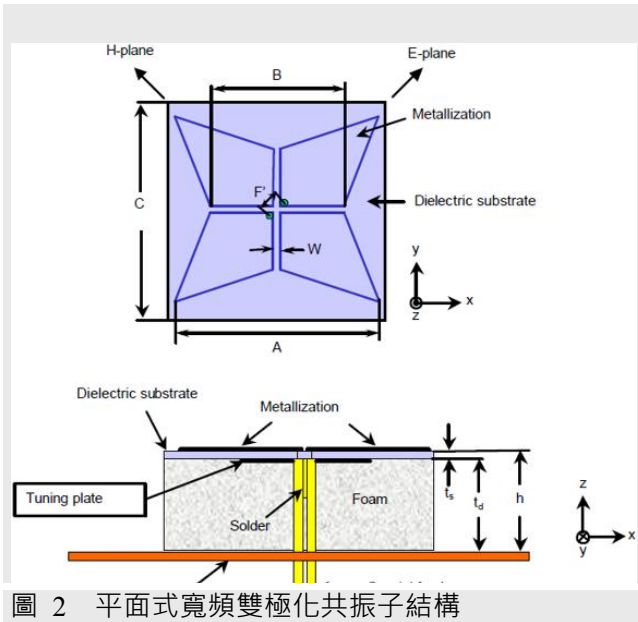


圖 2 平面式寬頻雙極化共振子結構

3. 寬頻雙極化共振子設計

搜尋過相關平面式雙極化共振子的文獻

後，我們產生如圖3之初版平面式雙極化共振子雛形設計，其主要結構包含兩對相互正交之交叉偶極天線、兩條同軸電纜(coaxial cable)與一反射板(reflector)。交叉偶極天線圖案設計成葉狀並蝕刻於厚度0.8mm之Rogers RO4003C介質基板上，其介電係數(permittivity)為3.55，損耗正切(loss tangent)為0.0027，基板尺寸 $47 \times 47 \text{mm}^2$ 。兩對交叉偶極天線分別藉由15cm之RG-402編織鍍錫線材來饋入，傳輸線特性阻抗為50歐姆，此種線材能承受大功率能量，同時減少傳遞過程中之能量損耗，常被使用於基地台天線中連結各項元件，當RG-402線長為10~20cm間之插入損耗(insertion loss)僅約0.2dB。平面式雙極化共振子下方有一厚度為1mm之金屬反射板做為系統接地面，其尺寸為 $100 \times 100 \text{mm}^2$ ，而共振子與反射板之間的距離為24mm，約為交叉偶極天線中心共振頻率的四分之一波長。

圖4為圖3初版平面式雙極化共振子結構之散射參數模擬結果，從圖中可知雙極化共振子

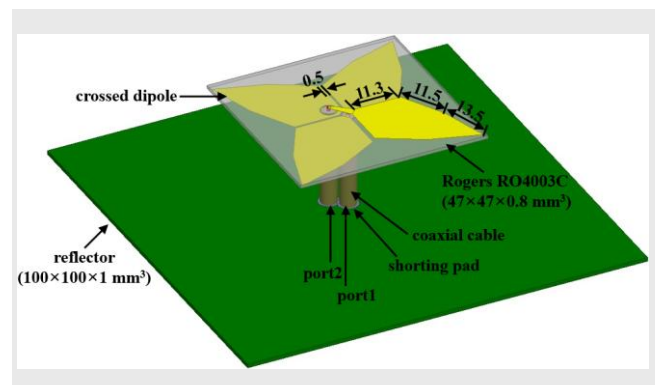


圖 3 初版平面式雙極化共振子雛形設計

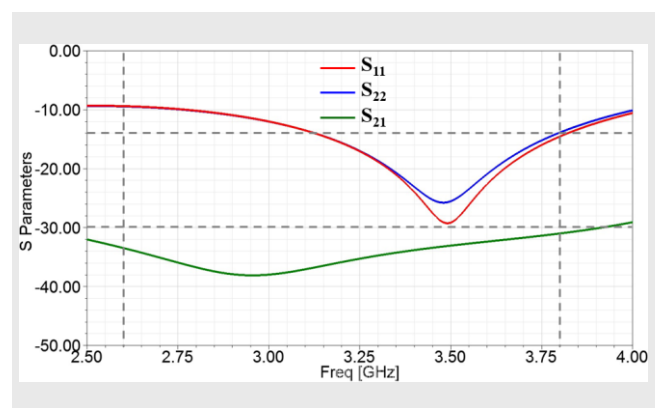


圖 4 初版平面式雙極化共振子散射參數模擬結果

的返回損耗(return loss)以電壓駐波比1.5:1定義作為標準，其阻抗頻寬僅可涵蓋3130MHz~3800MHz頻率範圍，低頻段之阻抗頻寬明顯不足。

為了改善圖3平面式共振子低頻段阻抗匹配不佳之問題，我們特別加入四個金屬圓柱連通共振子本體及反射板，其餘架構尺寸維持不變，如圖5所示之範例。由於金屬圓柱的存在，使得原本同軸電纜與反射板連接處所聚集之強表面電流得以沿著反射板分佈至金屬圓柱，因此表面電流分佈變得更加平緩，能夠有效改善共振子低頻阻抗匹配之水準，進而提升其操作頻寬。

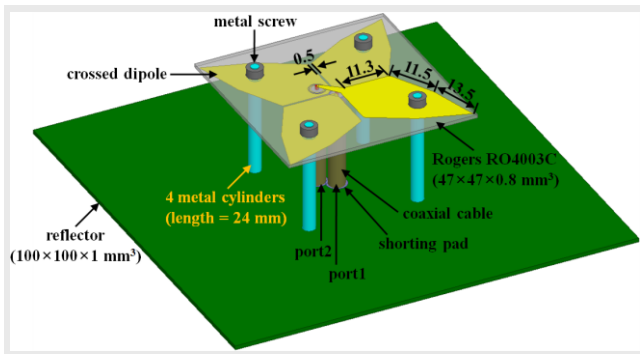


圖 5 寬頻雙極化共振子範例

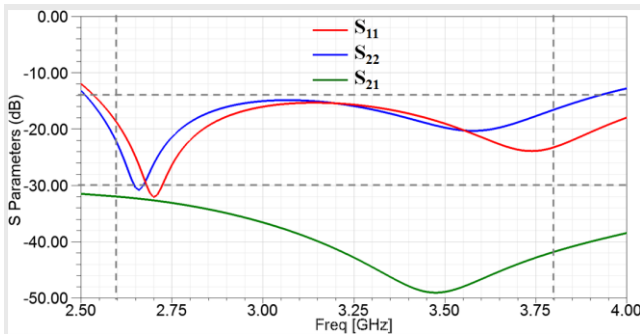


圖 6 寬頻共振子散射參數模擬結果

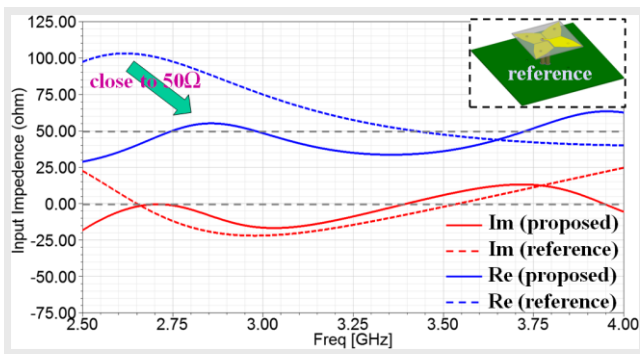


圖 7 共振子輸入阻抗模擬數據比較

圖5寬頻雙極化共振子範例之散射參數模擬結果如圖6所示，從圖中可知雙極化共振子的返回損耗仍以電壓駐波比1.5:1定義作為標準，其阻抗頻寬可涵蓋2540MHz~3910MHz操作頻帶，雙埠隔離度於操作頻帶內則可大於30dB，滿足一般基地台天線規範之要求。為了更加了解共振子之寬頻現象，我們亦分析其輸入阻抗表現，如圖7所示。當尚未加入金屬圓柱時，在操作頻段內之虛部阻抗接近0歐姆，但其低頻頻段之實部阻抗大約100歐姆，難以匹配至50歐姆之同軸電纜。在置入金屬圓柱後，此時共振子獲得較均勻之饋入電流分佈，降低低頻頻段之實部阻抗至50歐姆附近，同時虛部阻抗仍可維持0歐姆附近，因此能有效改善其共振子操作頻寬。

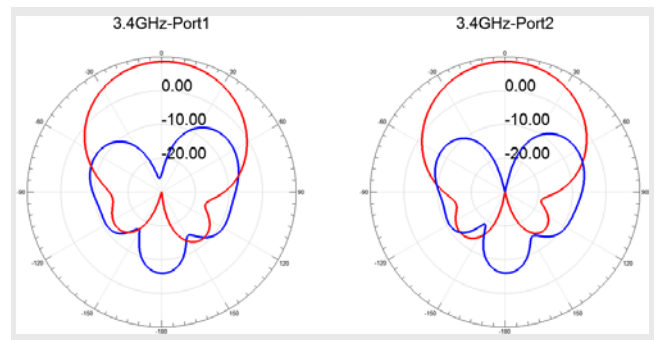


圖 8 共振子中心頻率二維輻射場型模擬結果

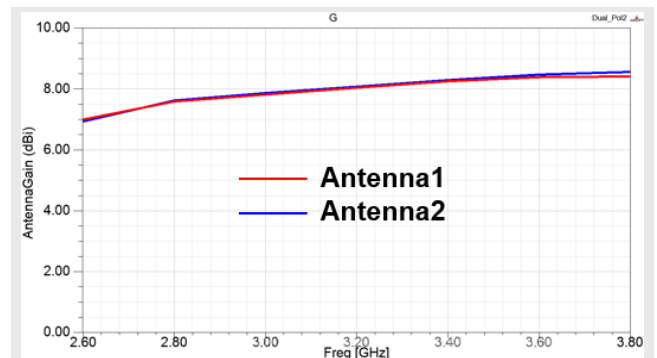


圖 9 雙埠天線增益模擬表現

除了滿足散射參數之規範要求外，在遠場輻射特性方面亦有許多重要參數需要考量。共振子中心頻率二維輻射場型模擬結果如圖8所示。由圖中可知，無論Port1或Port2激發時，共振子中心頻率之波束前後比約為15dB，前後比代表天線對後波瓣抑制之優劣參考依據，當後波瓣輻射功率過大時將會產生越區覆蓋產生掉

話現象。一般基地台天線前後比需大於25dB，然而當共振子排列為天線陣列將因天線增益值的提高而獲得改善。此外從二維輻射場型亦可得知其中心頻率半功率束徑寬(Half Power Beamwidth, HPBW)為65°，符合基地台天線之要求，此項參數太大時同樣會造成越區覆蓋現象，而半功率束徑寬太小時則會產生收訊死角。天線增益兩埠則介於7.0dBi~8.5dBi之間，如圖9所示，之後隨著天線陣列共振子數量增加，天線增益值將會隨之提高。

4 · 高隔離度1x4天線陣列設計

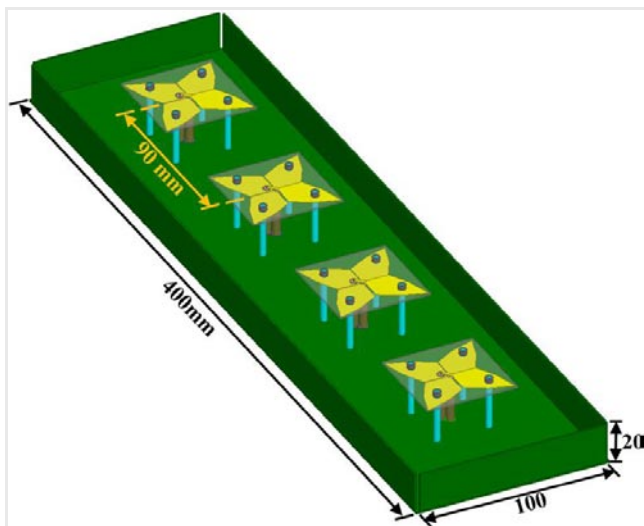


圖 10 初版1x4寬頻天線陣列結構

大型基地台應用之扇形分區天線(sector antenna)往往需要較高的天線指向性，以達到增加通訊距離的目的，實務上常採用天線陣列的設計來實現，為此我們提出一項具有高隔離度之1x4天線陣列。在實際應用上，基地台的同一組極化陣列應整合成單埠，因此我們會利用兩組寬頻一分四等功率分配器(power divider)，分別將能量饋送至四個共振子上。圖10為初版1x4寬頻天線陣列結構，其中共振子採用本論文圖3之設計，反射板底部尺寸為400×100mm²，其長寬與一般主流規格之扇形分區天線相當，此外沿著反射板邊緣圍起的20mm金屬側牆可抑制背向輻射提升波束前後比。各個共振子之間距為90mm，約為最低操作頻率2600MHz的0.78波長，最高操作頻率3800MHz的1.14波長，避免天線單元間距過大時，在操作頻帶內高頻部分

於主輻射方向場型有凹陷情況，使得天線增益下降。在天線極化配置方面，採用+45°/-45°雙極化組態，此為業界常見之主流設計，其考量是著眼於維持兩組極化的天線其輻射場型在水平切面有相同的波束寬度，並且使各自的傳播通道在統計上不會有太大的差異。兩組極化的天線有其各自獨立的饋入，當雙埠隔離度夠高時，可用來支援雙路MIMO(Multi-input Multi-output)、或分別給傳送/接收使用，又或當作分集(diversity)選擇之用，具有很高的使用彈性。

此外，在四個共振子中我們以功率均分且零相位差之訊號源來饋入，同時需要滿足較寬之操作頻寬，圖11所示即為我們所設計的寬頻一分四等功率分配器，其返回損耗如圖12所示，可輕易涵蓋所須操作頻帶，而插入損耗則如圖13所示，其浮動範圍與不同埠間的差異皆小於0.3dB，因此本項一分四等功率分配器為一特性不錯之測試模板。

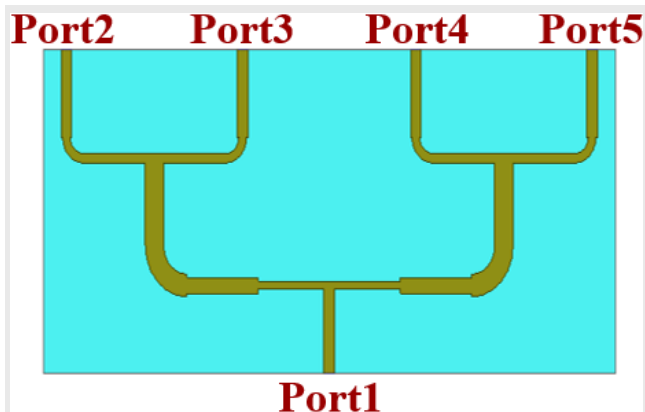


圖 11 寬頻一分四等功率分配器結構

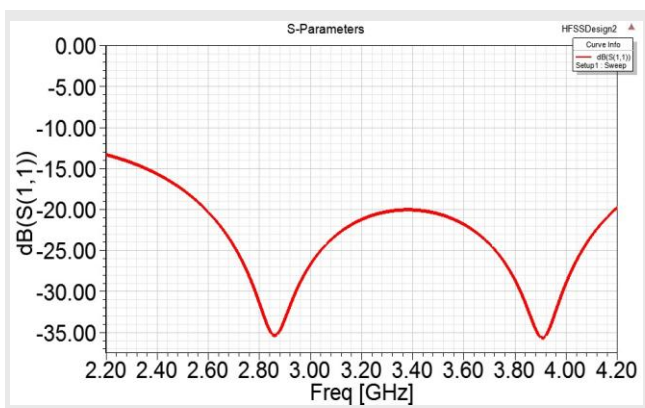


圖 12 寬頻一分四等功率分配器返回損耗表現

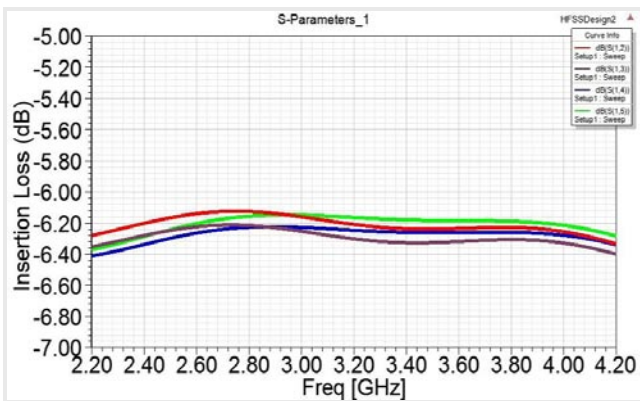


圖 13 寬頻一分四等功率分配器插入損耗表現

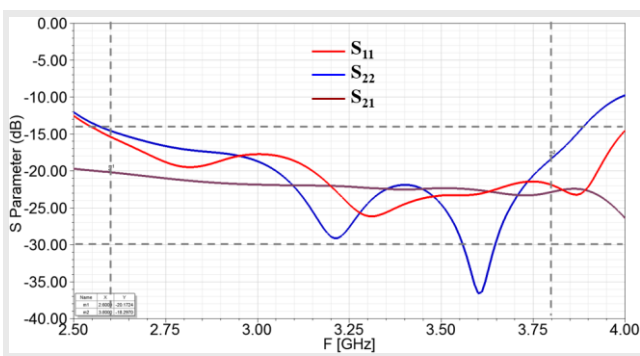


圖 14 1x4寬頻天線陣列散射參數模擬結果

接著我們將上述一分四等功率分配器套用到圖8之天線陣列後可得到圖14之散射參數表現，從圖中可知天線陣列返回損耗表現同樣以電壓駐波比1.5:1定義作為標準，其天線陣列阻抗頻寬仍可輕易涵蓋2600MHz~3800MHz操作頻帶，但其雙埠隔離度於操作頻帶內僅大於20dB，這是由於各個共振子之間有能量耦合現象產生之故。一般拉大共振子之間距是一個改善雙埠隔離度之方法，但這將使得光柵波瓣 (grating lobe) 的數目增加，不利於天線陣列垂直方向之波束塑形。因此在間距不能在拉大的情況下，需藉由其他方式來改善雙埠隔離度。

針對基地台天線雙埠隔離度改善手法我們搜尋相關文獻，其中主要包含兩種可行解耦方式。案例[4]採用方形框框把個別共振子圍起來，主導共振子邊界的反射特性，甚至將方框高度增至與共振子齊高，因此組成天線陣列後雙埠隔離度不太會有新的變化。但此項設計之共振子必須一開始就在有方框的環境下設計為佳，若已完成共振子設計後才置入將影響原有天線阻抗匹配情況，因此不適用於圖10之天線陣列結構。

此外案例[5]則是在反射板上加上L型金屬片等隔離度調整結構，以位置、距離、高度、長度等來控制這些額外產生的反射大小與相位，使其與因組成陣列造成邊界條件改變多增加的洩漏量相消。但此法若使用電磁模擬軟體參數化設計將相當耗時，改以直接實作量測進行調整，靠經驗與試誤法來達成應是較有效率的方式。

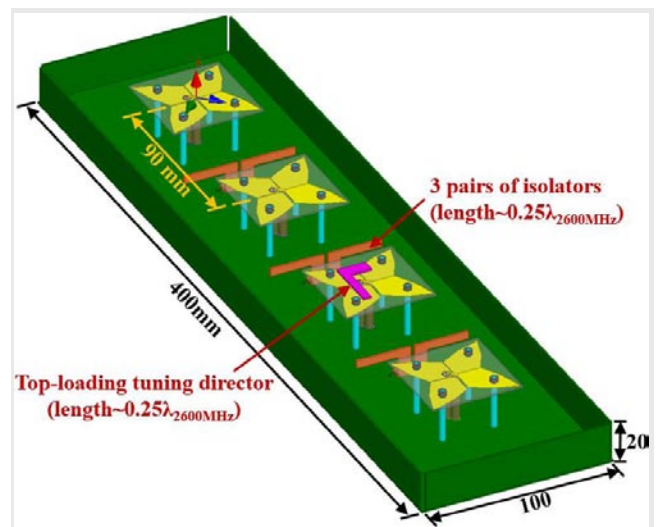


圖 15 高隔離度1x4天線陣列結構

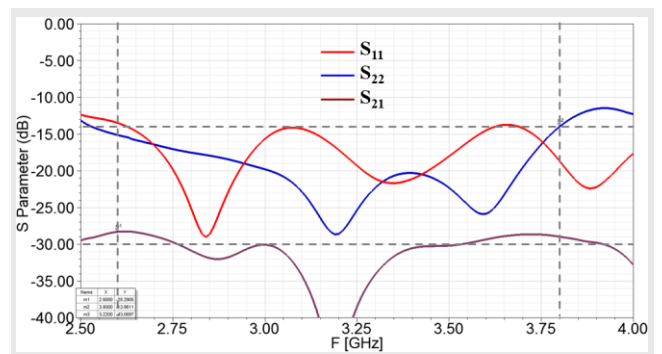


圖 16 高隔離度1x4天線陣列散射參數模擬結果

圖15與圖16所示為利用倒L形金屬片 (isolator) 以及負載調整導向器 (top-loading tuning director) 以改善隔離度之天線陣列結構與模擬散射參數表現，與圖10比較可以得知，天線陣列整體尺寸仍為 $400 \times 100 \times 25 \text{mm}^3$ ，反射板側牆高度20mm，但在四個共振子中間分別植入三組倒L形解耦器，藉此將個別共振子激發時所產生的接地面表面電流導引至倒L形解耦器，降低透過接地面耦合至鄰近共振子上，雙埠隔離度因此從原本的20dB改善至26dB，而天

線陣列返回損耗仍可維持14dB以上。

然而這樣仍無法達到基地台天線規格要求的30dB，因此我們試著在天線陣列中其中一個共振子上方加入一負載調整導向器，將天線陣列能量往主要方向輻射出去，減少背向輻射於反射板間之場量，雙埠隔離度得以獲得改善，利用此方法在不增加整體天線陣列尺寸的情況下，使得天線陣列能達到30dB的雙埠隔離度規範。

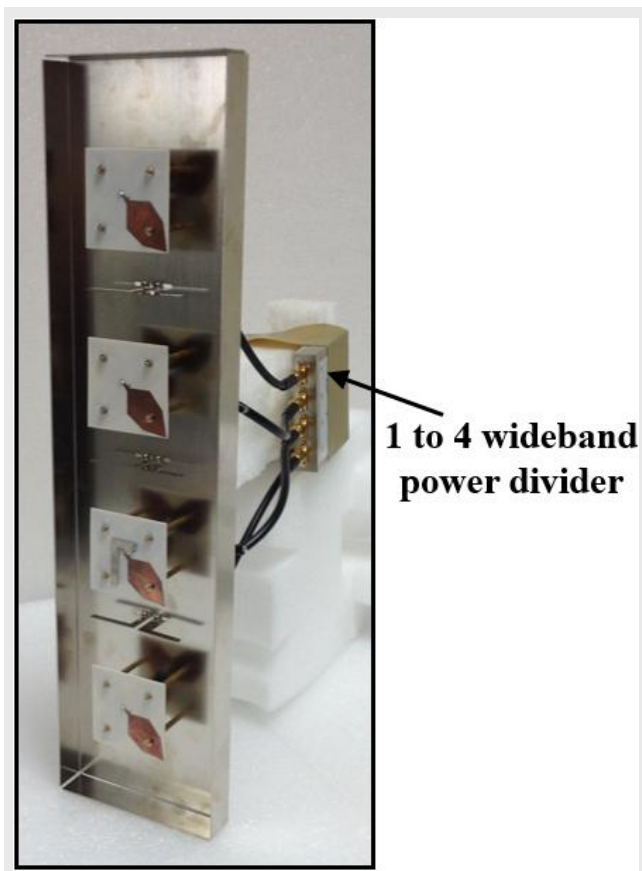


圖 17 1x4高隔離度天線陣列實作照片

圖17所示為依據圖15結構實際製作之樣品，四個共振子皆蝕刻於Rogers RO4003C基板上，介電系數3.55，板厚0.8mm，銅厚0.5oz，利用螺絲、螺帽及25cm銅柱固定於反射板上。此外反射板上另有8個孔洞方便銲接饋入RG-402同軸電纜，並將其接地編織網焊接於反射板。而後將銲接至共振子之同軸電纜利用SMA接頭分別連結至一分四等功率分配器，最後即可得到本項設計之雙埠基地台天線陣列樣品。在量測散射參數表現方面如圖18所示，天線陣列的返回損耗以1.5:1 VSWR定義作為標

準，天線一(紅)及天線二(藍)可涵蓋2600MHz至3800MHz，而兩天線陣列間之隔離度則大於30dB，已可達到基地台天線陣列之高隔離度要求規範。

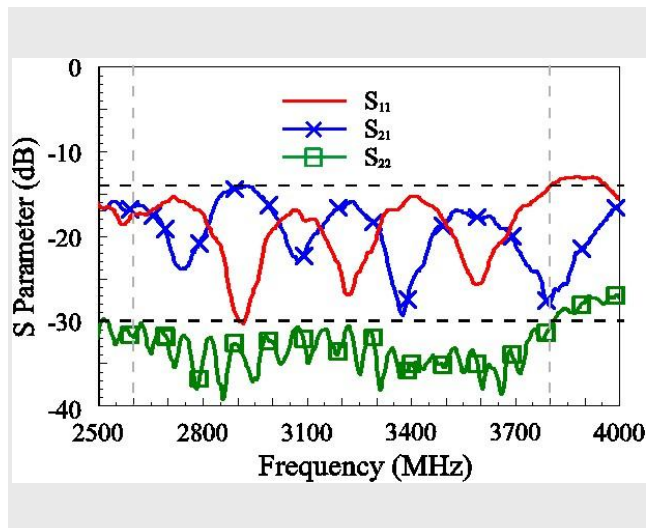


圖 18 高隔離度1x4天線陣列散射參數量測結果

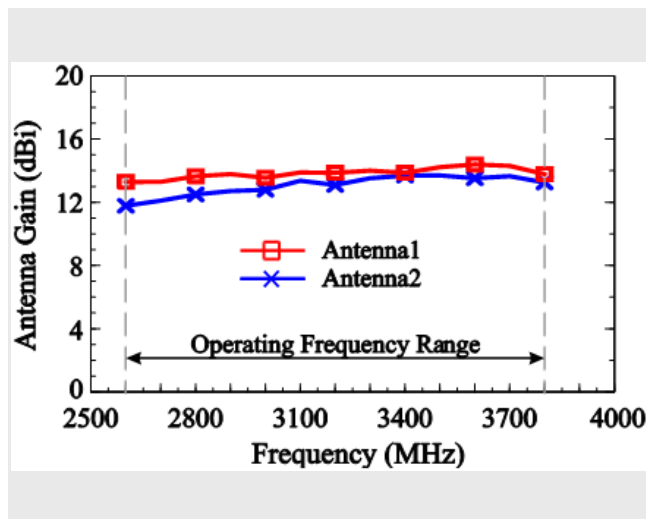


圖 19 天線陣列增益值量測數據

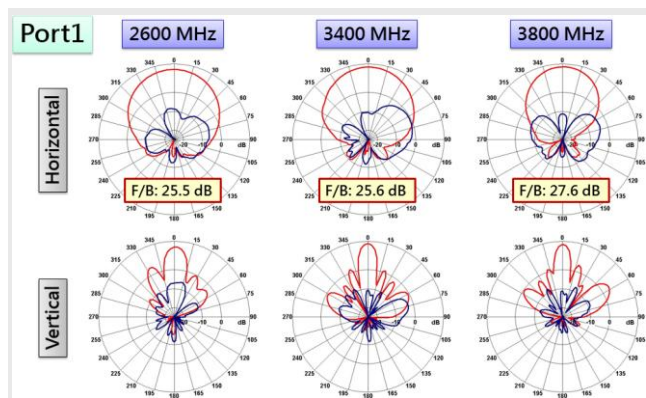


圖 20 天線陣列二維輻射場型量測結果(Port1)

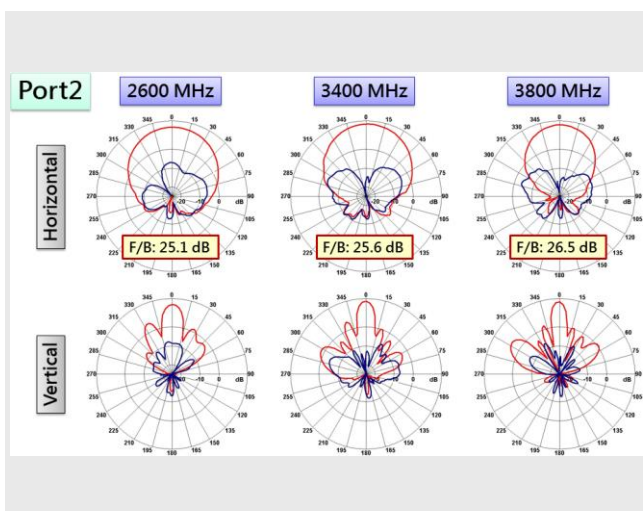


圖 21 天線陣列二維輻射場型量測結果(Port2)

在遠場輻射特性方面，天線增益兩埠皆介於 11.8dBi~14.4dBi 之間，如圖 19 所示。二維輻射場型量測結果則如圖 20 及圖 21 所示，其中包含操作頻率 2600MHz、3400MHz 及 3800MHz 之水平及垂直切面表現，由圖中可知，無論 Port1 或 Port2 激發時，操作頻帶範圍內之前後比皆可大於 25.1dB，可滿足基地台天線陣列規格之要求。而其他相關遠場場型參數亦可得知，水平切面半功率束徑寬介於 46°~67° 之間，垂直方向則介於 11°~16° 之間，由於本項設計為具有 4 個共振子之陣列，因此在垂直方向之場型將被壓縮，因此半功率束徑寬較窄屬合理之現象。另一方面，從輻射場型圖亦可得知雙埠天線是否具有良好的正交極化特性，已確保雙極化天線在傳送接收到的信號互不相關。在本項天線陣列設計中其主輻射方向之交叉極化比值(Cross Polar Ratio, XPR)大於 20dB，符合基地台天線陣列之需求。

此外，在都會區等人口密集區域範圍由於無線通信傳輸量龐大，且因樓房建築物遮擋與多重路徑反射之因，單一基地台難以達到範圍通信傳輸，因此常採用蜂巢式基地台佈建於人口密集區域。此外為了能調整基地台覆蓋區域範圍，一般基地台天線具有約 10 度電下傾角 (electrical downtilt)，已使垂直方向輻射場型可以更加朝向用戶端。然而此時主波束上側的旁波瓣將會指向前方另一區域基地台進而干擾其運作，故上旁波瓣抑制 (Upper Sidelobe

Suppression, USLS) 將顯得格外重要。在本項天線陣列設計中其上波瓣抑制大於 10.3dB，接近基地台天線陣列要求之規格，若將饋入網路改以非等功率分配器實現，預期上波瓣抑制能力將可獲得改善。

5 · 結論

在本文章中，我們提出一項平面式寬頻雙極化共振子，利用金屬柱連通交叉偶極天線雙臂及反射板，改善低頻段阻抗匹配不佳之情況，進而提升共振子操作頻寬。此外為了提升基地台陣列天線雙埠隔離度，我們使用倒 L 形解耦器與負載調整導向器，藉以擾動原有反射板上的表面電流並減少背向輻射於反射板間之場量，在 $400 \times 100 \times 25 \text{ mm}^3$ 之整體尺寸下得到較佳之雙埠隔離度表現。量測結果方面，天線操作頻寬可涵蓋 2600~3800MHz，雙埠隔離度可大於 30dB，而天線增益兩埠皆介於 11.8dBi~14.4dBi 之間。其主輻射方向之交叉極化比值皆大於 20dB，上波瓣抑制大於 10.3dB，操作頻帶範圍內之天線輻射波束前後比則大於 25.1dB，而水平切面半功率束徑寬介於 46°~67° 之間，垂直方向則介於 11°~16° 之間。表 1 即為本項設計基地台天線陣列技術主軸與國際上既有技術 [6][7] 比較。

表 1 基地台天線技術主軸與國際上既有技術比較

	Kenbotong [6]	CommScope [7]	ITRI
天線架構 (~4 units)			
天線尺寸	$660 \times 160 \times 80 \text{ mm}^3$ (Height: $4.8 \lambda_{2200\text{MHz}}$)	$600 \times 170 \times 105 \text{ mm}^3$ (Height: $4.4 \lambda_{2200\text{MHz}}$)	$400 \times 100 \times 25 \text{ mm}^3$ (Height: $4.3 \lambda_{3200\text{MHz}}$)
操作頻率	1710~2690 MHz	1710~2690 MHz	2600~3800 MHz
天線增益	14.5~15.5 dBi	13.4~14.5 dBi	11.8~14.4 dBi
HPBW	Horizontal: 62°~66° Vertical: 9°~14°	Horizontal: 61°~70° Vertical: 13°~18°	Horizontal: 46°~67° Vertical: 11°~16°
USLS (first lobe)	> 15 dB	> 14 dB	> 10.3 dB
F/B ratio	> 25 dB	> 25 dB	> 25 dB
Cross polar ratio	> 15 dB	> 15 dB	> 20 dB
VSWR	< 1.5	< 1.5	< 1.5
Isolation	> 28 dB	> 25 dB	> 30 dB

參考文獻

- [1] The ITU website. [Online]. Available://
<http://www.itu.int/en/Pages/default.aspx>
- [2] J. R. Nealy, “Foursquare antenna radiating
element,” U.S. Patent 5 926 137, July 20,
1999.
- [3] S. Y. Suh, and W. L. Stutzman, “Fourpoint
antenna,” U.S. Patent 6 842 141, Jan. 11,
2005.
- [4] M. Gottl, and S. Berger, “Reflector for a
mobile radio antenna,” U.S. Patent 6 930
651, Aug. 16, 2005.
- [5] J. R. Ippolito, H. Villegas, and J. S.
Wilson, “Base station antenna for dual
polarization,” U.S. Patent 6 072 439, June
6, 2000.
- [6] The Kenbotong Technology website.
[Online]. Available://www.kenbotong.com/
- [7] The CommScope website. [Online].
Available://www.commscope.com/

作者簡介

陳偉吉



現任職於工研院資通所無線
新應用射頻技術部副工程
師，畢業於國立中山大學電機
工程學系碩士班。專長為天線
設計與研發。

[E-mail: chenwj@itri.org.tw](mailto:chenwj@itri.org.tw)

王榕穎



現任職於工研院資通所無線
新應用射頻技術部副工程
師，畢業於國立台灣大學電信
工程學研究所碩士班，專長為
天線理論分析與射頻電路設
計。

[E-mail: pjwang@itri.org.tw](mailto:pjwang@itri.org.tw)

郭李瑞



現任職於講裕實業股份有限公司
研發處長，2009年取得元智大
學通訊工程研究所博士學
位，主要負責基地台天線設計
開發。

[E-mail: ruei@whayu.com](mailto:ruei@whayu.com)

林泰宏



現任職於講裕實業股份有限公司，
電信事業處研發部正工程
師，正修科技大學電子工程研
究所碩士畢業，主要負責產
品基站天線研發設計開發。

[E-mail: tedlin@whayu.com](mailto:tedlin@whayu.com)