

The Design of Two-Dimensional Switched-Beam Phase Array

Chia-Ming Hsu and Chu-Yu Chen *

Department of Electrical Engineering
National University of Tainan, Tainan, 70005, Taiwan

*E-mail : cychen57@mail.nutn.edu.tw

Abstract

The proposed phase array is composed of two parts, Butler matrix network and antenna array. The three-arm branch line couplers are employed to provide the required phase difference for functioning switched-beam. The simulation results show that both return loss and insertion loss over a frequency range of 4.8GHz-7.5GHz are less than -10 dB and more than -6 dB, respectively. The 2×2 cross dipoles with return loss bandwidth of about 3 GHz are designed into the antenna array part and characteristic of realized gain of 14 dBi. After the integration of the two parts, the main beam of the proposed array is scanned with different 2D directions. The phase array system is simple and effective and can be implemented in modern mobile communication networks.

Keywords: Butler Matrix, coupler, Switched-beam, Phase array

二維波束切換之相位陣列天線設計

許家銘, 陳居毓

國立臺南大學電機工程學系

摘要

本論文之相位陣列天線由巴特勒矩陣網路及超寬頻交叉偶極天線所組成。採用三臂式分支耦合器(three-arm branch coupler)來作為巴特勒矩陣網路的單位元件，進而組成寬頻巴特勒矩陣網路(Butler matrix network)來提供不同輻射場型方向所需之相位差。反射損失(Return loss)於 10 dB 以下可操作頻率範圍在 4.8GHz-7.5GHz，頻寬百分比為 44%，且插入損耗(Insertion loss)能達到-6dB；則天線部分應用其操作頻率範圍在 4.5GHz-7.5GHz 的超寬頻交叉偶極天線，並藉由巴特勒矩陣網路創造的相位差，達到具有多個區域波束切換(Switched-beam)的效果，同時主波束與旁波瓣相差 12dB，其主波束最大增益可以達到 14dBi 為高指向性的特性。因此證實提出的新穎的二維波束切換相位陣列天線可以應用於目前無線區域網路 WLAN (Wireless local area network)通訊系統；可以應用於下一代之通訊系統中。

關鍵詞：巴特勒矩陣、耦合器、波束切換、相位陣列天線

1. 緒論

由於無線通訊技術快速的發展，通訊裝置對多媒體等資訊的傳輸需求日漸增長，目前第四代通訊系統已被許多國家廣泛的發展使用，例如：全球行動通訊系統(global system for mobile communication, GSM)、數位通訊系統(digital communication system, DCS)與個人通訊服務(personal communication service, PCS)等。受多媒體資訊量的增多、互聯網的進步與日益增加的連線裝置，且現代人對於高速行動資料的渴求是無止境的，使得對頻寬需求大量增加，第四代通訊系統勢必備受挑戰，因而，近年幾年各國開始著手發展第五代通訊系統，並預計於近年達成商業化目的。

針對第五代行動通訊系統在使用端的傳輸速率需具有 10 至 100 倍的提升外，而單位面積下系統資料量需有 1,000 倍以上的提升。這裡要瞭解到為增加訊號傳輸速率，而須提升通道容量；要提升通道容量，其一種方式是改善訊號對雜訊比，其二就是增加頻寬；再則應用多輸入多輸出(MIMO)技術，來提升通道容量。波束成形(Beam forming)技術亦是目前用來改善訊號對雜訊比最常見的技術之一，其利用發射能量較集中的場型覆蓋目標裝置，除能改善傳輸距離，也能將波束對準其用戶端，減少非對象裝置之干擾，提升通道容量的訊雜比，進而改善通訊品質。[1]與[2]是應用波束掃描方式，對一維平面做輻射場形方向的改變，這兩篇參考論文的天線端應用了微帶天線來輻射，但大多實際情況下，接收裝置不位於同一平面上，因此需要多方向的波束切換；以參考論文[3]與[4]則皆是以二維波束方向上做切換，兩者在相位網路是應用混合式耦合器來組成的，而天線端[3]是使用步階式微帶天線，操作頻率範圍為 6 GHz；而[4]則是應用 2x8 堆疊式貼片天線來做設計，操作於 55 GHz-60 GHz 的頻率範圍內，是具有非常寬頻之特性，且由[4]的參考論文中可以發現，此架構具有使用於毫米波段的潛力，且由於頻率位於毫米波因而網路的尺寸可以縮小；因此為了設計出二維波束切換的相位陣列天線，可先藉由[5]波束的合成與[6]得出二維相位計算公式，設計相位網路的架構，並與寬頻天線做結合形成本論文的二維波束切換相位陣列天線。在天線部分[7]為參考原型來設計，其天線為交叉偶極天線並應用 90 度相位傳輸線產生相移，使得水平與垂直電流之間遇有 90 度相位差，產生圓極化的特性；其操作頻率範圍於 1.1-1.8GHz 的頻率下，且由於結構簡單天線的輻射效率也較佳。[8] 操作是以領結形天線的方式具有寬頻的特性，其操作頻率為 1.2 GHz-1.6 GHz 之間且具有圓極化之特性，與前一篇參考論文相同的是，兩者皆是應用傳輸線來做兩分支的相位差，去實現水平與垂直電流的相位差，達至圓極化之特性。

本文架構共分三節，首先開始為緒論，說明研究動機與研究方向；接下來將開始介紹相位陣列天線系統原理與分析的部分，而此節將相位陣列天線分為兩部分，主要相位網路的結構設計與天線的結構設計來做介紹，其天線端為了製作具有圓極化，應用了交叉偶極天線來做設計，則另外網路端則是應用三臂式分支耦合器來組成；第三節為相位網路與天線做整合的相位陣列天線響應與輻射場型，圖 1 為其切換場型的示意圖；最後第四節為結論與未來展望。

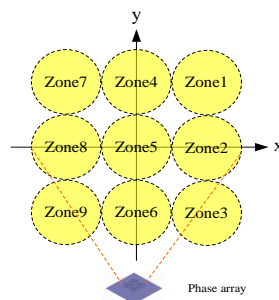


圖 1 波束切換之示意圖

2. 相位陣列天線原理與分析

2.1 巴特勒矩陣之設計

在此將上相位天線分做兩個部分，網路端與天線端來做分析，首先是線在網路端來做分析與設計。在相同天線以陣列方式進行信號的加權合成，以利形成理想的信號，這樣能夠形成固定指向的輻射波束，此稱做波束成形(Beam forming)，[5]中提及波束成形實現需要考慮饋入相位、單一天線的輻射與天線間之間距。然而期望波束能對不同方向來做指向，可是天線排列為陣列形式時，大致上天線間距已被固定，所以若要具有波束的切換的效果，需要考慮饋入天線端的訊號具有相位差來做實現，故利用相移器來產生相位上的差異，以達到波束的切換，實現後能提供更有效率的訊號傳播方式傳送至接收裝置，因此參考論文中[6]列出了二維主波束方向角與相位之關係式：

$$\varphi_0 = \tan^{-1} \left(\frac{\beta_y d_x}{\beta_x d_y} \right) \quad (1)$$

$$\theta_0 = \sin^{-1} \sqrt{\left(\frac{\beta_x}{kd_x} \right)^2 + \left(\frac{\beta_y}{kd_y} \right)^2} \quad (2)$$

若固定 d_x 和 d_y 時，即是決定了 $\beta_x, \beta_y, \varphi_0$ 與 θ_0 之間的數值；本論文將以二維波束切換為設計，並產生出九個區域方向的波束，並應用相位網路去做切換。達成具有九個區域(Zone)波束方向， β_x 和 β_y 以相位 $-90^\circ, 0^\circ, 90^\circ$ 交互作排列出九種波束的，既然具有實現波束方向的相位值與天線概略間距值列出表 1。

表 1 主波束之相位差與方向角對應關係

	(β_x, β_y)	(φ_0, θ_0)
Zone1	$(90^\circ, 90^\circ)$	$(45^\circ, -26^\circ)$
Zone2	$(90^\circ, 0^\circ)$	$(0^\circ, -18^\circ)$
Zone3	$(90^\circ, -90^\circ)$	$(135^\circ, 26^\circ)$
Zone4	$(0^\circ, 90^\circ)$	$(90^\circ, -18^\circ)$
Zone5	$(0^\circ, 0^\circ)$	$(0^\circ, 0^\circ)$
Zone6	$(0^\circ, -90^\circ)$	$(90^\circ, 18^\circ)$
Zone7	$(-90^\circ, 90^\circ)$	$(135^\circ, -26^\circ)$
Zone8	$(-90^\circ, 0^\circ)$	$(0^\circ, 18^\circ)$
Zone9	$(-90^\circ, -90^\circ)$	$(45^\circ, 26^\circ)$

在巴特勒矩陣的單一元件是以三臂式分支耦合器來組成的，分支耦合器即是定向耦合器的其中一種，此為定向耦合其的個別情況，為控制剛好的耦合強度，使得端口 1 至端口 2 與端口功率分配相同，因此具有相同的輸出功率，且輸出相位為 90° ；若只是同的功率分配相同，故稱做混合式耦合器(Hybrid coupler)；在混合式耦合器也必須符合這些特性，如耦合性、方向性、隔離度。增加耦合自由度獲得的寬頻增加，因此在設計上藉由增加耦合強度進而提出的三臂式分支耦合器，其特性具有更大頻寬的性質，且輸

出端口依舊能維持 90 度之相位差，圖 2 為其結構概略圖。

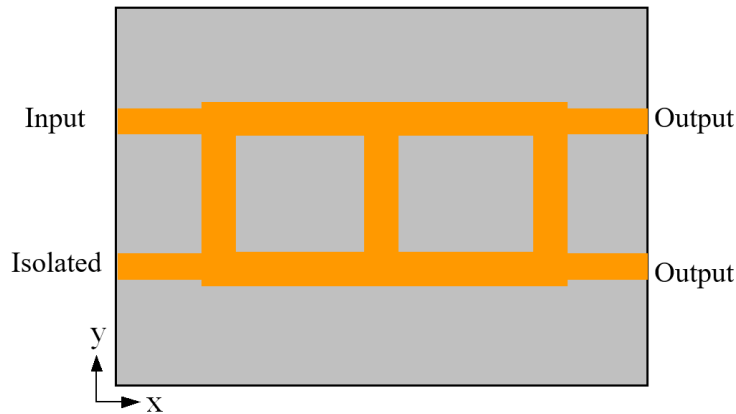


圖 2 三臂式分支耦合器之架構圖

2.2 巴特勒矩陣架構

由於相位陣列天網路是透過多個移相器之元件的組合，因此使用寬頻的三臂式分支耦合器來做相位的提供之外，由於本身具有較寬頻的特性，因此其網路的組成出的網路響應頻也具有寬頻的特性。前面所計算出的天線間相位差，因此可以直接藉由相位差 90 度的三臂式分支耦合器直接作相位之設計，其設計出的矩陣網路架構如圖 3 所示。外輸入端口為實做將安裝 SMA 接頭而有些微出距離；假設輸入端口 1 輸入訊號，會經由 4 個 90 度耦合器來產生相位差，直到輸出端口時，呈現與彼此鄰近的端口相差 90 度，而與對角端口相差 180 度的相位，因此產生某方向的波束指向。圖 4 與圖 5 為其網路架構的反射損失(return loss)與各端口之相位，反射損失部分為於 10dB 以下可操作頻率範圍在 4.8GHz-7.5GHz，頻寬百分比為 44%，且插入損耗(Insertion loss)能達到 -6dB，故若將匹配部分做好，能盡可能減少能量反射導致輸入隔離度變差與避免天線的輻射效率降低。

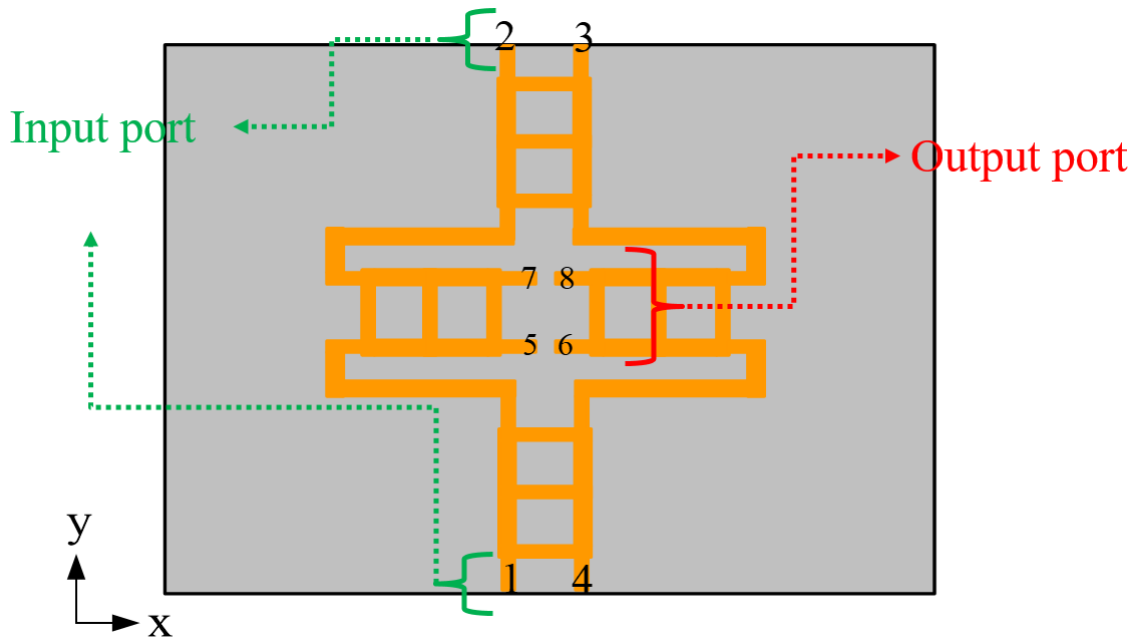


圖 3 巴特勒矩陣之概略架構圖

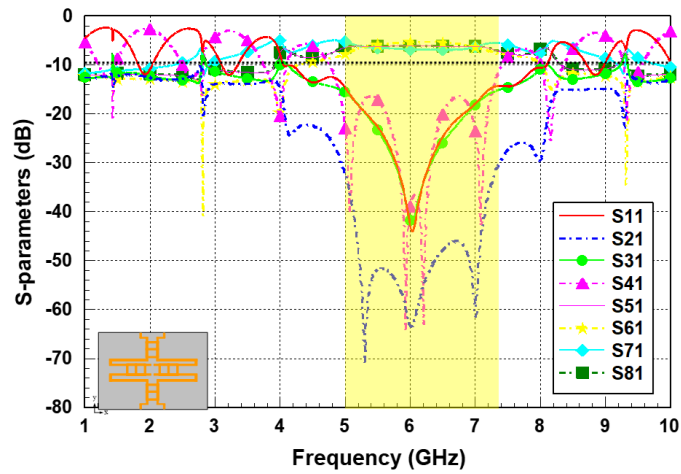


圖 4 巴特勒矩陣網路之響應圖

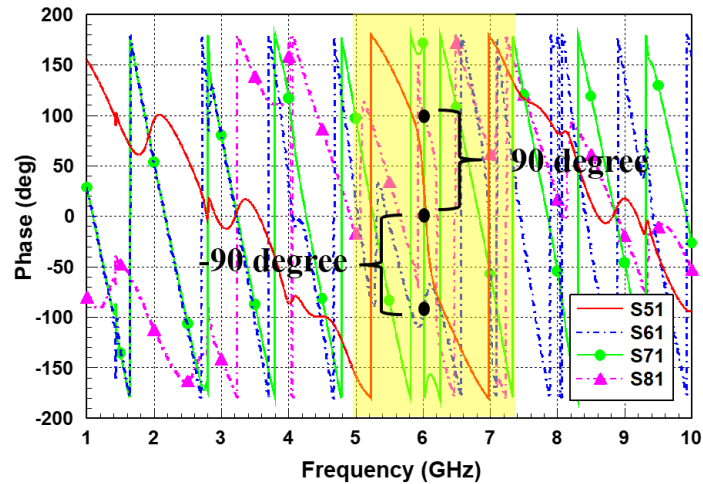


圖 5 巴特勒矩陣網路各輸出端口之相位

2.3 交叉偶極天線之設計

此交叉偶極天線是藉由參考論文分[7]為原型來設計，操作於 6GHz 並製作於 Roger4003 板材上其高度為 0.8mm，其天線的雙臂是分別設計於板材上下兩面，並應用了圓弧形傳輸線來做相位差，使得具有雙極化性質的交叉偶極天線，呈現圓極化的特性，此天線響應頻寬於 -10 dB 以下可以達 4.52GHz-6.83GHz 範圍，其模擬結構與響應圖分以圖 6 與圖 7，而在 5.0-5.7GHz 之範圍內具有圓極化的特性，這是藉由傳輸線提供的相位差所產生的，其圓極化響應可以由圖 8 表示之。

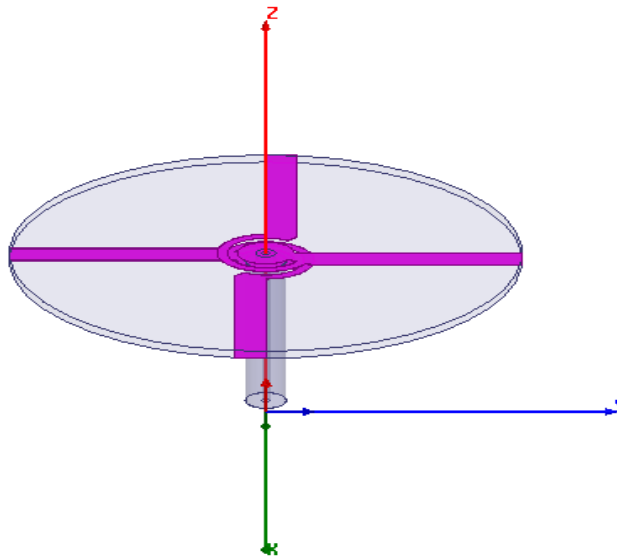


圖 6 交叉偶極天線的模擬架構

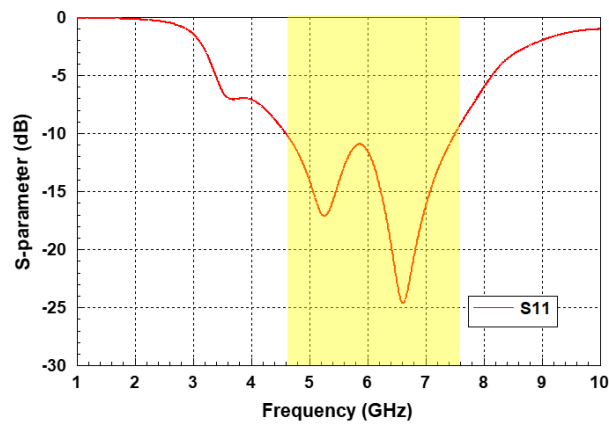


圖 7 交叉偶極天線之反射損耗

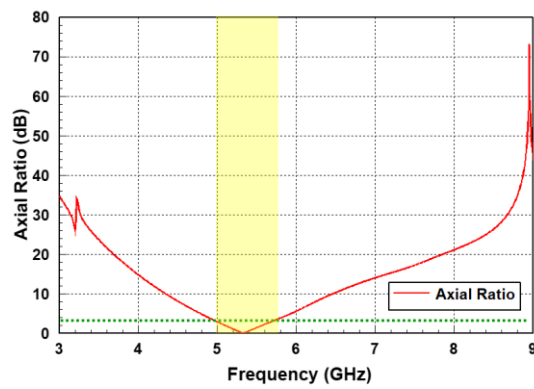


圖 8 交叉偶極天線之響應

3. 相位天線之結果討論

3.1 網路端與天線端整合

在此將分別設計的天線端與相位網路端來做結合以完成相位陣列天線的設計，其中以計算好的網路應用同軸線的方式做饋入至陣列天線端，並且 2×2 陣列天線是以單一天線為間距排列需再從新考慮，儘管已有假設好的半波長之距離，但計算後與實際的實現還是需在做些為調整，由於間距的設計增加減少也必須留意到，間距的減少會使得波束寬增加，但同時可能影響到切換系統的干擾；然而間距的增加，亦會使得波束寬減少，但當間距過大於一個波長時，可能會產生光柵波瓣(Grating lobe)，進而造成場型嚴重改變，無法將能量集中到預想的位置，經過調整後其為最佳的波束合成距離大概為 30mm 。其中考慮兩者之匹配，假設若有訊號傳至天線端時不匹配，將會導致訊號反射至輸入端口，導致其中的幾個輸入端口隔離度不佳，有機會使得電路的主動元件故障。

3.2 模擬結果

由圖 9 透過陣列天線與設計出的單一天線增益作比較，使得指向性大為增加，由最大增益 9dBi 提升至 14dBi 。然而前面提到的饋入天線端是將天線至於網路的金屬地面位置，第一是為隔絕輻射場型影像至網路的端口，造成端口彼此隔離度較差，第二則是渴望獲得更好的增益，因此使用金屬地面當作反射器的效果影響輻射場型提高指向性。連結兩端的匹配好，故而由圖 10 在端口反射損耗與隔離的都具有 -10dB 與 -15dB 的響應，其頻率範圍可以以由 5.2GHz 到 10GHz ；再者最後波束指向以 3D 輻射場型圖的圖 11 來分別作區域 3、區域 5 與區域 7 表示，顯示出此網路的相位差確實能提供波束切換的能力。

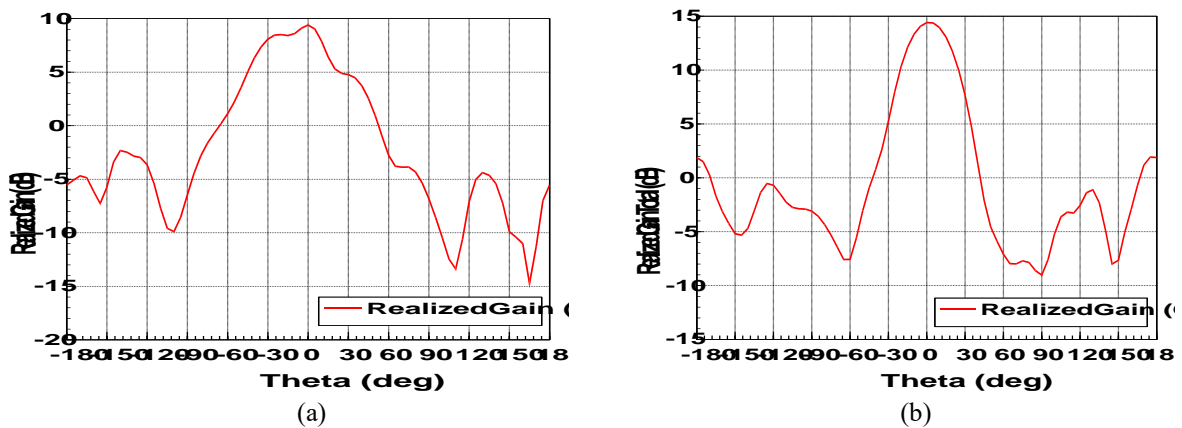


圖 9 (a)單一天線之增益圖 (b)陣列天線之增益圖

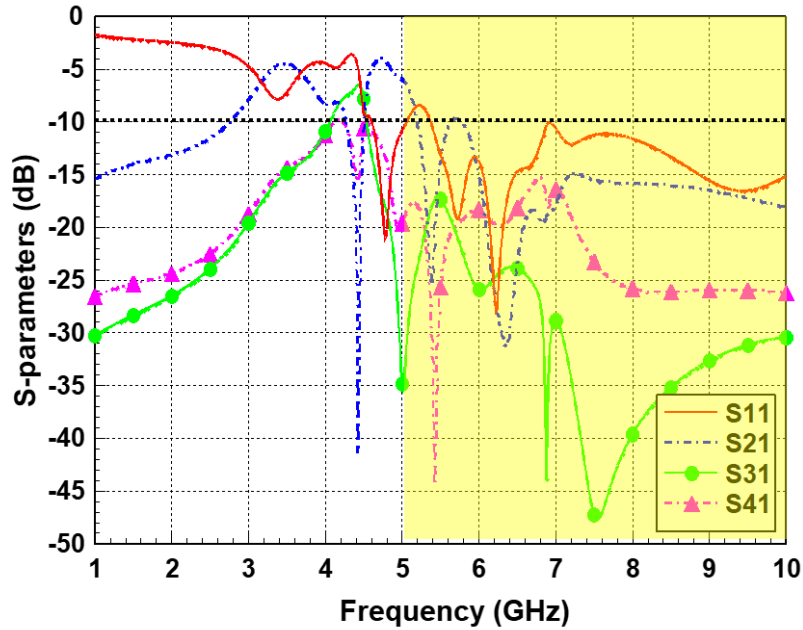


圖 10 相位陣列天線之響應

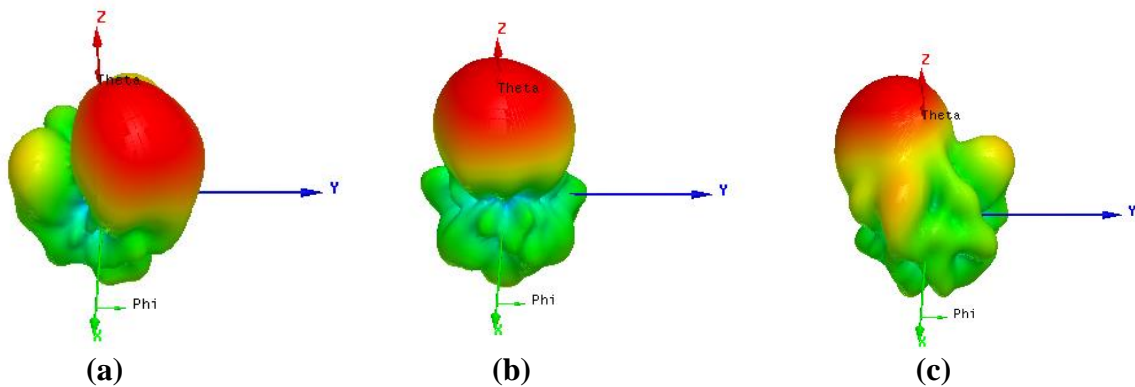


圖 11 (a)區域 3 (b) 區域 5 (c) 區域 7 之波數切換方向

4. 結論與未來展望

本文之設計可以應用 WLAN 與 WiMAX 頻帶的相位陣列天線，此寬頻巴特勒矩陣網路系統運用波束切換技術，來提供不同輻射場型方向所需之相位差，使天線波束確實能在九個子區域中進行二維方向交互作用波束切換且其主波束最大增益可以達到 14dBi。而整合後的天線由於匹配良好，其響應頻率範圍可由 5.2GHz 到 10GHz。在未來毫米波系統中無線通訊的傳輸備受考驗，由於毫米波亦容易受到阻擋物干擾，且位於密集城市環境中，需要訊號的通訊裝置並非皆位於相同的位置，因此毫米波的系統中需具有高增益的天線與波束成形系統相當之重要。而在毫米波頻段下，巴特勒矩陣所製成的相位陣列天線除了符合有高增益與波束切換之特性外，尺寸因毫米波之波長短，使得架構更縮小化，可應用於未來的通訊系統之中。

5. 參考文獻

- [1] C. Liu, S. Xiao, Y. Guo, M. Tang, Y. Bai and B. Wang, "Circularly Polarized Beam-Steering Antenna Array With Butler Matrix Network," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 10, pp. 1278-1281, 2011.
- [2] M. M. Cao, X. Wang, X. N. Huo, X. F. Wang and S. X. Wang, "A novel dual band and dual circularly-polarized multi-beam antenna based on Butler matrix," *2017 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC)*, Verona, 2017, pp. 64-66.
- [3] S. A. Babale, O. Elijah, S. K. A. Rahim and S. I. Orakwue, "Two-dimensional beam-steering phased-array utilizing 2×2 Butler matrix," *2017 IEEE 3rd International Conference on Electro-Technology for National Development (NIGERCON)*, Owerri, 2017, pp. 245-248.
- [4] W. F. Moulder, W. Khalil and J. L. Volakis, "60-GHz Two-Dimensionally Scanning Array Employing Wideband Planar Switched Beam Network," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 9, pp. 818-821, 2010.
- [5] D.M. Pozar and B. Kaufman, "Design considerations for low sidelobe microstrip arrays," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol.38, pp.1176-1185,1990.
- [6] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 3rd ed. New York, NY, USA: Wiley, 2005.
- [7] A. Okba, S. Chariot, P. Calmon, A. Takacs and H. Aubert, "Cross dipoles rectenna for microwave applications," *2016 46th European Microwave Conference (EuMC)*, London, 2016, pp. 930-933.
- [8] Y. Li, X. Liang, X. Bai, L. Liu, J. Geng and R. Jin, "An ultra-wideband cross-dipole antenna with wide beam for dual-polarization applications," *2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, Vancouver, BC, 2015, pp. 2027-2028.
- [9] H. H. Tran, S. X. Ta, and I. Park, "Single-feed, wideband, circularly polarized, cross bowtie dipole antenna for global navigation satellite systems," *J. Electromagn. Eng. Sci.*, vol. 14, no. 3, pp. 299–305, Sep. 2014.
- [10] M. Makimoto and S. Yamashita, "Bandpass filters using parallel coupled stripline stepped impedance resonators," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 28, no. 12, pp. 1413-1417, Dec. 1980.
- [11] B. Y. Toh, R. Cahill, and V. F. Fusco, "Understanding and measuring circular polarization," *IEEE Trans on Education*, vol. 46, no.3, Aug. 2003.
- [12] David K. Cheng, *Field and Wave Electromagnetics*, 2nd Ed., Pearson P T R, 1989.