

113 年度國防部補助軍事院校教師(官) 從事學術研究計畫

結合理論與實踐之高增益線性陣列設計
開發教學

結案報告



執行單位:空軍航空技術學院航空通電系

計畫主持人:副教授廖家德兼通電系主任

中華民國 113 年 11 月 29 日

目錄

圖目錄.....	II
表目錄.....	IV
第一章 序論.....	1
第二章 研究原理.....	3
第三章 研究分析與探討.....	18
第四章 預期效益與對軍事教育改革潛力.....	31
第五章 結論與未來展望.....	32
第六章 計畫編組與計畫成果.....	34
參考文獻.....	38

圖目錄

圖 1 兩點波源之座標軸	5
圖 2 電場向量加總圖	5
圖 3 兩點波源激發振幅和相位相同所產生之輻射場型圖	6
圖 4 點波源 1 移至中心點座標軸	7
圖 5 電場向量加總圖	7
圖 5 阻抗轉換器電路圖	7
圖 6 間距 $d = \lambda/2$ 之相位變化圖	8
圖 7 不同角度之波前傳遞至陣列天線單元圖 (a) 45° 波前 (b) 垂直波前	10
圖 8 調整相位應用於相控陣列天線架構圖	11
圖 9 相移角 $\Delta\phi$ 與波束轉向角示意圖	12
圖 10 計畫團隊先期規畫之平面式八木線性陣列天線結構圖	12
圖 11 數值模擬陣列天線單元相位差使主波束角度偏移正規化 2D 輻射場型圖	13
圖 12 陣列天線單元間距、相位差和波束角度趨勢圖	14
圖 13 天線單元因素和陣列因素所結合的輻射場型圖	15
圖 14 天線單元為 8、16 和 32 組形成的線性陣列天線正規化輻射場型圖	16
圖 15 天線單元為 8、16 和 32 組形成的線性陣列天線正規化輻射場型圖	17
圖 16 模擬平面式八木線性陣列天線正規化輻射場型圖	18
圖 17 集成巴倫(Balun)之等效電路圖	20
圖 18 結構分析之輸入阻抗史密斯圖	21
圖 19 天線單元之平面式八木天線幾何結構圖	21
圖 20 模擬單天線單元之平面式八木天線反射係數圖	22
圖 21 具有寄生式 Loop 的雙天線單元之平面式八木天線幾何結構圖	24
圖 22 模擬有無寄生式 Loop 於雙天線單元之平面式八木天線的相互耦合係數圖	24
圖 23 模擬 Port 1 激發於 28 GHz 時表面電場強度分佈圖	25
圖 24 模擬 Port 1 激發於 28 GHz 時表面電場向量分佈圖	25
圖 25 具有寄生式金屬指向器的雙天線單元之平面式八木天線幾何結構圖	26
圖 26 模擬 Port 1 及 Port 2 激發於 28 GHz 之表面電場強度	

分佈	26
圖 27 八天線單元之平面式八木線性陣列天線幾何結構圖	28
圖 28 八天線單元之平面式八木線性陣列天線波束成型 2D 輻射場型圖	29
圖 29 八天線單元之平面式八木陣列天線波束成型 3D 輻射場型圖	29
圖 28 本案成果參加 2024IIC 國際發明競賽(a)獎狀、(b)金牌、(c)獲獎人員合影	錯誤! 尚未定義書籤。

表目錄

表 1 計畫編組	34
表 2 計畫之執行進度甘特圖	36

第一章 序論

依據我國最新的國防報告書中，通訊技術被強調為當代軍事戰略的一個核心組成部分。高增益陣列天線作為這一技術的重要支柱，在現代軍事行動中發揮著至關重要的作用。這類天線能夠提供高度集中的信號傳輸和接收能力，使軍事通訊更為精準和高效。在電子戰和遠距離監測中，高增益陣列天線能夠有效增強信號接收能力，從而提升整體作戰能力。

隨著技術的進步，軍事通訊系統正變得越來越複雜，對操作人員的技術要求也隨之提高。在此背景下，軍事院校教育的目標之一便是培養能夠理解並應用這些先進技術的專業人才。高增益陣列天線的設計與開發不僅是一項技術挑戰，更是一種融合理論與實踐的綜合性學問。這要求學習者不僅要掌握相關的理論知識，還要能夠將這些知識應用於實際的設計和操作中，此外，隨著信息戰和網絡戰的興起，傳統的軍事衝突形態正在發生變化。在這種環境下，有效的通訊系統是獲得信息優勢、執行精確打擊的關鍵。高增益陣列天線的應用可提供更好的信號控制和較寬的頻帶範圍，從而在電子戰中發揮重要作用。因此，在軍事院校中對這一技術進行教學和研究，對於提升未來軍隊的技術水平和作戰能力具有重要意義。

根據最新國防報告的指出，隨著全球軍事平衡的變化和技術進步，現代軍隊越來越依賴先進的通訊系統來執行多樣化的任務。在這種背景下，高增益陣列天線設計開發的教學在軍事院校中變得極為重要。這一研究的源起在於兩個方面：一是為了提高軍事通訊的有效性和可靠性，二是為了培養能夠適應未來戰爭需求的高素質軍事人才，首先，高增益陣列天線在提升信號的有效覆蓋範圍、增強通訊質量方面扮演著關鍵角色。這對於在多變的戰場環境中保持穩定的通訊連接至關重要，尤其是在遠距離和複雜環境中。因此，研究高增益陣列天線的設計與開發，不僅有助於提升軍事通訊技術，還能增強軍隊在現

代戰爭中的信息優勢，其次，隨著軍事技術的不斷進步，未來的軍事人員需要具備更高的技術素養和創新能力。通過在軍事院校中對高增益陣列天線設計開發的教學，不僅能夠提供學員深入理解現代通訊技術的機會，還能激發他們的創新思維和解決問題的能力。這對於培養能夠應對未來戰場挑戰的軍事領導人才具有重要的意義。

因此，本研究的目的是在於探索高增益陣列天線的最新設計理念和技術，並將這些知識融入軍事院校的教學中。這不僅會增強學習者對於這一重要軍事通訊技術的理解，還會為他們提供實際操作和應用這些技術的機會，這項研究的範疇主要聚焦於高增益陣列天線的設計、開發及其在軍事應用中的實際運用。研究將涵蓋從基本理論、設計方法到實際製造和測試的全過程。具體而言，這包括了對高增益陣列天線工作原理的深入分析、設計策略的探討、材料和技術的應用，以及這些天線在特定軍事場景中的性能評估，此外，這項研究還將探討如何將高增益陣列天線設計開發的知識有效地融入軍事院校的教學體系中。這包括課程設計、教學方法的創新、實驗和實習活動的組織，以及評估學生學習成效的方法，然而，這項研究也面臨著一定的限制。首先，高增益陣列天線的設計和製造涉及到高度專業的知識和技術，這要求研究者和學習者具備先備的知識。其次，天線性能的測試和評估需要先進的儀器設備和實驗條件，這可能對一些院校來說是一個挑戰。最後，將這些技術知識有效地轉化為教學內容，並確保學生能夠理解並運用這些知識，也是一項不小的挑戰。這不僅涉及到課程內容的設計和更新，還包括教學方法的創新和實踐活動的組織。所以高增益陣列天線設計開發在軍事院校教育中的重要性不言而喻。它不僅是提升軍事通訊技術的關鍵，也是培養未來軍事人才的重要途徑。透過本計畫的執行，期望克服這些挑戰，將高增益陣列天線技術融入軍事教育中，為未來的軍事挑戰培養出更多優秀的人才。在這些項目中，參與研究人員與學生可以將理論與實際應用結合，以實踐高增益線性陣列天線為主題，教師的專業發展和學生的實踐技能培養是相互促進

的，而現代化的教學資源和設施則為這一過程提供了必要的支持，通過本計畫執行，可以有效地提升軍事院校教師和學生在高增益陣列天線設計與開發方面的技術能力，透過這種全面的策略，軍事院校能夠培養出具有高度專業技能和創新能力的人才，為未來的軍事挑戰做好準備。

第二章 研究原理

本案計畫研究目的為透過本計畫執行，完成結合理論實踐高增益線性陣列天線設計，由於目前毫米波所規範的 FR2 頻段中的可用頻譜範圍較廣(24250 ~ 52600 MHz)，使得毫米波通訊為未來擴展無線數據流量的最佳方案之一。但是毫米波在無線電波的高頻物理特性會遭受較大的路徑損耗和有限的散射，因而發展出大規模多輸入多輸出(MIMO)技術和波束成形技術。本計畫預計所提出應用於毫米波頻段的平面式八木線性陣列天線，將採用偶極天線結合集成巴倫電路設計，並透過寄生式 Loop 改善陣列天線單元之間相互耦合特性(相互耦合係數 < -25 dB)【目標應用於波束成型時最大掃描角度可達 110° 、峰值增益需達為 14 dBi 以上，且達到良好的旁波瓣位準，使陣列天線應用於波束成形時可擁有良好的掃描性能】。

研究內容部分首先需要先讓參與人員了解陣列天線原理，以下擇要說明如下：

陣列天線的基本定義為兩個以上的天線單元所組成的天線，並使用兩個天線單元的點波源形成陣列的輻射場型。假設兩個天線單元為全方向性(isotropic)且點波源振幅和相位相同，圖 1 顯示出了兩點波源放置於坐標軸，坐標軸中心原點為兩點波源中心點，點波源 1 座標為(-

1/2,0)、點波源 2 座標為(1/2,0)和間距 d 。若遠場觀測點(Far-field observation point)位於坐標軸的第一象限，而坐標軸中心點設為參考點，點波源 1 所落後的相位 ϕ 為式(1)

$$\text{The phase of point source 1} = \frac{1}{2}d_r \cos \phi \quad \text{式(1)}$$

點波源 2 所領先的相位 ϕ 為式(2)

$$\text{The phase of point source 2} = \frac{1}{2}d_r \cos \phi \quad \text{式(2)}$$

其中 d_r 為點波源 1 和點波源 2 所使用弧度表示的電場距離式(3)

$$dr = \frac{2\pi d}{\lambda} = \beta d, \text{ where } \beta = \text{phase constant} \quad \text{式(3)}$$

對於 ϕ 方向上遠場觀測點的總向量電場 E 為式(4)

$$E = E_0 e^{-j\psi/2} + E_0 e^{+j\psi/2}, \text{ where } \psi = d_r \cos \phi \quad \text{式(4)}$$

其中 E_0 為場強振幅的分量，最後將式(4)整理成式(5)

$$E = E_0 \cdot 2 \cos \frac{\psi}{2} = 2E_0 \cos \left[\frac{d_r \cos \phi}{2} \right] \quad \text{式(5)}$$

以上式(5)也可使用向量圖來呈現，圖 2 呈現了點波源 1 和點波源 2 的電場向量的加總。由於兩個點波源激發振幅和相位相同，總電場 E_0 的相位不會隨著 ψ 而改變，使用正規化令式(5)中的 $2E_0 = 1$ 並得出式(6)

$$E = \cos \left[\frac{\pi \cos \phi}{2} \right] \quad \text{式(6)}$$

由式 6 得出電磁學線上學習平台[28]所模擬出的場型圖 3，在 Y 軸 $E_{\theta}(\phi)$ 為 90° 和 270° 呈現最大值，而沿著 X 軸 $E_{\theta}(\phi)$ 為 0° 和 180° 呈現場型零點。

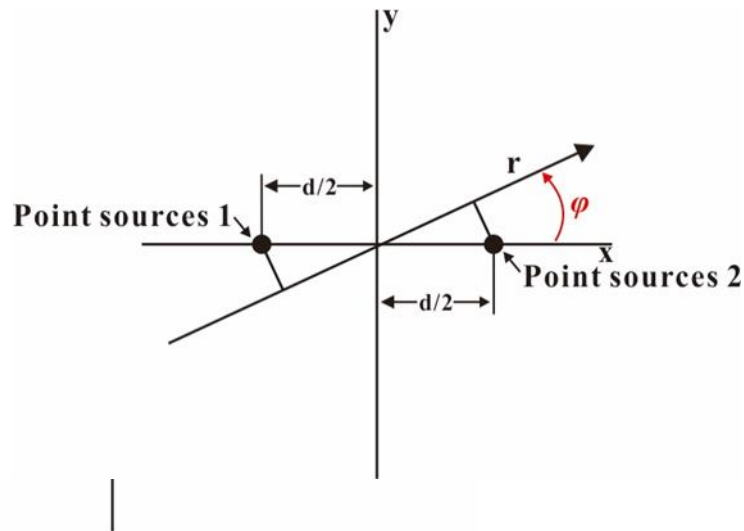


圖 1 兩點波源之座標軸

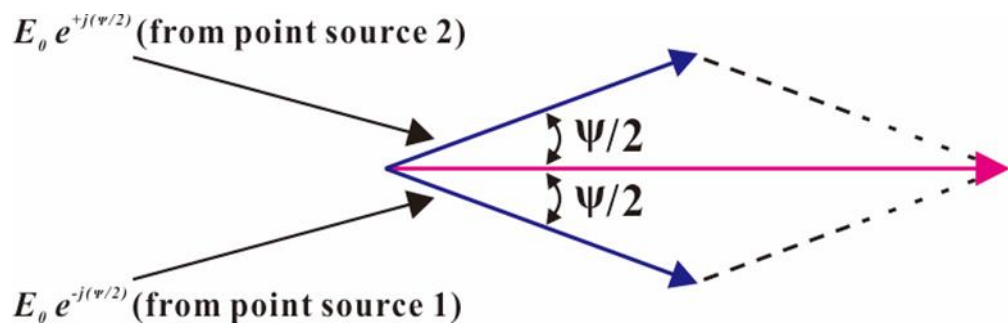


圖 2 電場向量加總圖

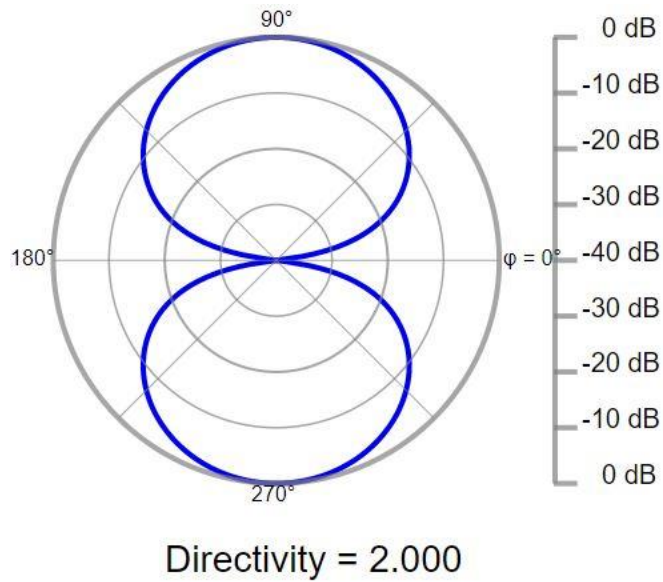


圖 3 兩點波源激發振幅和相位相同所產生之輻射場型圖

若將點波源 1 與點波源 2 的座標更換，如圖 4 點波源 1 位於座標軸原點中心參考點，而點波源 2 座標位於(1,0)使電場領先 $drcos\phi$ ，總電場向量 E 為式(7)

$$\begin{aligned}
 E &= E_0 + E_0 e^{+j\psi} \\
 &= E_0 e^{+j\frac{\psi}{2}} \left(e^{-j\frac{\psi}{2}} + e^{+j\frac{\psi}{2}} \right) \\
 &= E_0 e^{+j\frac{\varphi}{2}} \cdot 2\cos\frac{\varphi}{2}
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

以上式(7)也可使用向量圖呈現，圖 5 顯示了總電場 E 的振幅及相位隨著觀測角度 φ 而改變如式(8)

$$E = \cos\frac{\varphi}{2} \cdot e^{+j\varphi/2}
 \tag{8}$$

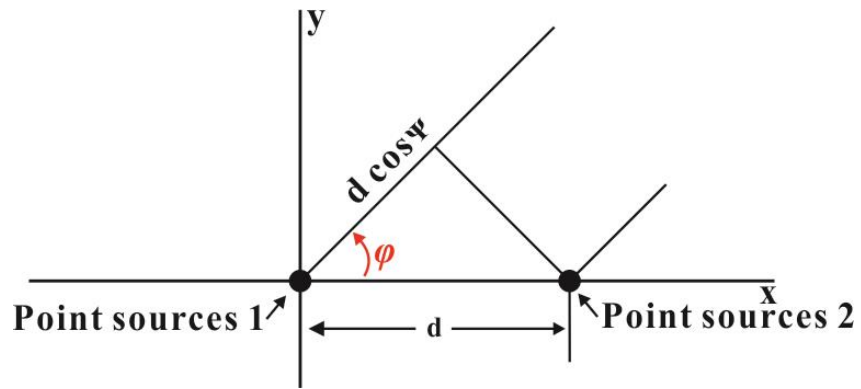


圖 4 點波源 1 移至中心點座標軸

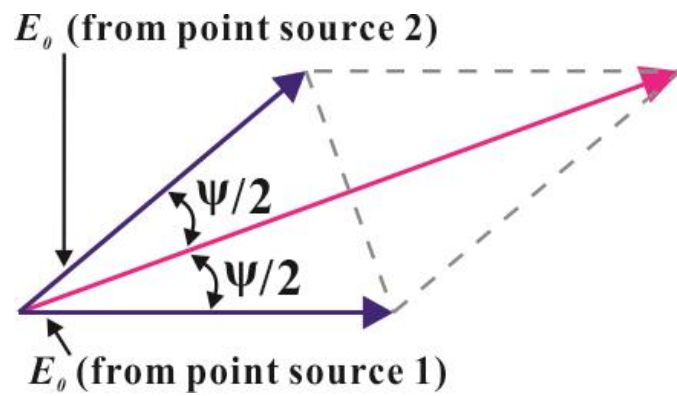


圖 5 電場向量加總圖

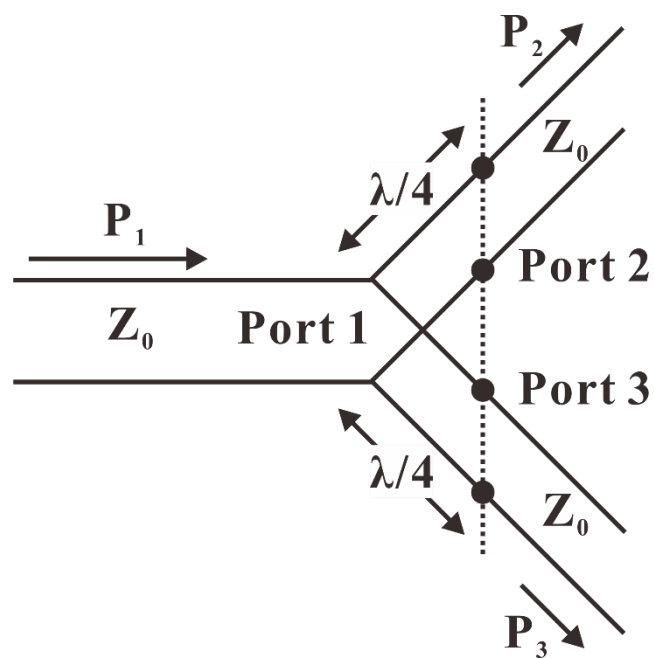


圖 6 阻抗轉換器電路圖

圖 6 表示了兩點波源間距 $\lambda/2$ 時相位的變化，對點波源 1 的相位幅度變化如式(9)

$$\frac{\varphi}{2} = \frac{\pi \cos \phi}{2} \quad \text{式(9)}$$

其相位幅度變化如圖 2 向量圖所示，當參考點為兩點波源間距的中心時，在遠場觀測點觀察時總電場 E_0 的相位不會隨著 ψ 而改變，若將參考點設為點波源 1 如圖 4 時，則會存在圖 5 向量圖所呈現的向量變化。

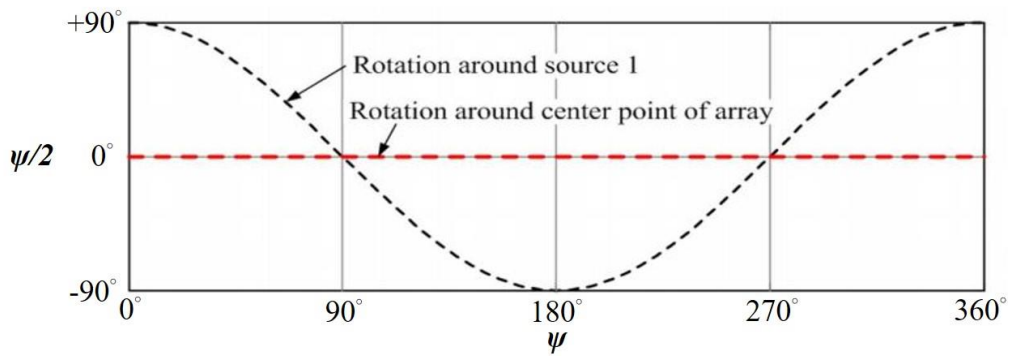


圖 7 間距 $d = \lambda/2$ 之相位變化圖

若兩個點波源振幅相同而相位差不等時，如圖 1 所呈現的點波源 1 激發時的相位落後於點波源 2 激發時的相位，造成在點波源 1 和點波源 2 在 ϕ 方向上的相位差 δ ，如式(10)

$$\psi = d_r \cos \phi + \delta \quad \text{式 (10)}$$

對於 ϕ 方向上的遠場觀測點的總電場向量 E 為式(11)

$$\begin{aligned} E &= E_0 e^{-j\psi/2} + E_0 e^{+j\psi/2} \\ &= 2E_0 \cos \frac{\psi}{2} \\ &= \cos \frac{\psi}{2} \end{aligned} \quad \text{式(11)}$$

【波束方向】說明：

在分析以上關於振幅及相位陣列公式後，也可將相控陣列實際應用波束成型 [29,30]，圖 3.7 顯示了兩個不同角度的波前傳遞至四個天線單元所形成的陣列，在每個天線單元的接收路徑增加時間延遲，最後將四組天線單元的場強向量做整合。在圖 7(a)顯示了當波前傳遞到每個天線單元的時間延遲和時間差為匹配的，在這種情況下所使用的時間延遲會使四個天線單元的場向量及相位在結合點同時到達，並且在輸出端獲得較大的輸出信號。而圖 7(b)雖然使用相同的時間延遲，但波前垂直於四個天線單元導致時間延遲造成相位不一致，造成輸出端的信號性能大大降低。

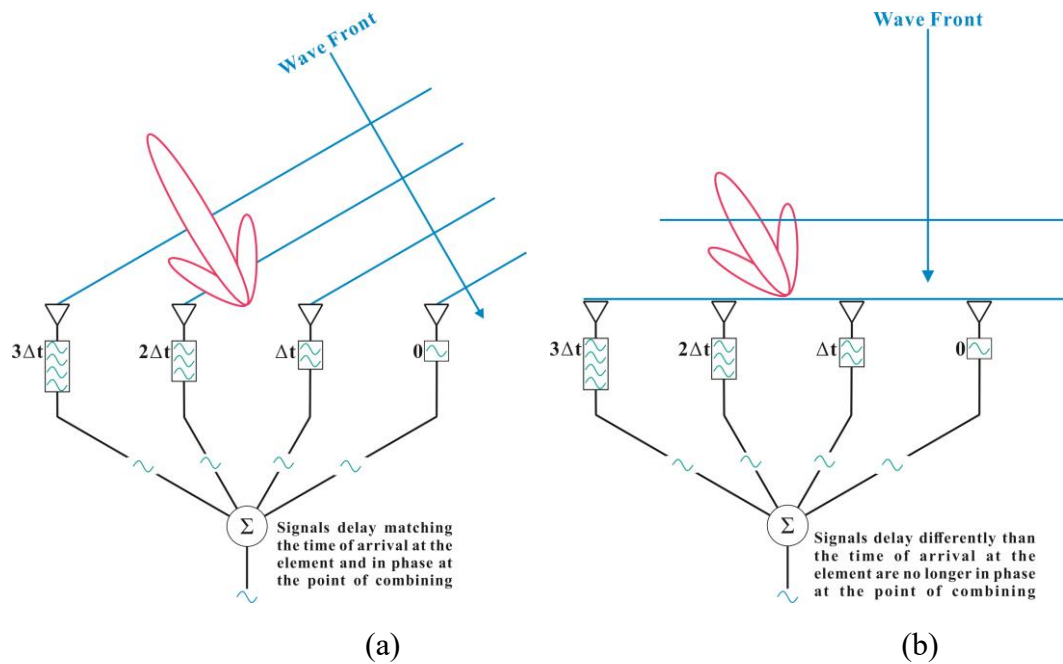


圖 8 不同角度之波前傳遞至陣列天線單元圖 (a) 45°波前 (b)

垂直波前

在相控陣列天線中，也可使用時間延遲來控制波束的轉向，且電磁模擬軟體也可透過調整輸出端的相位來進行模擬與分析。本計畫也將利用模擬軟體調整輸出端相位的功能實現波束成型的特性，圖 8 顯示了使用相位調整所形成的相控陣列天線。在實現波束轉向的特性前，也可透過數學計算出相位角度差及波束轉向角度的對應公式。

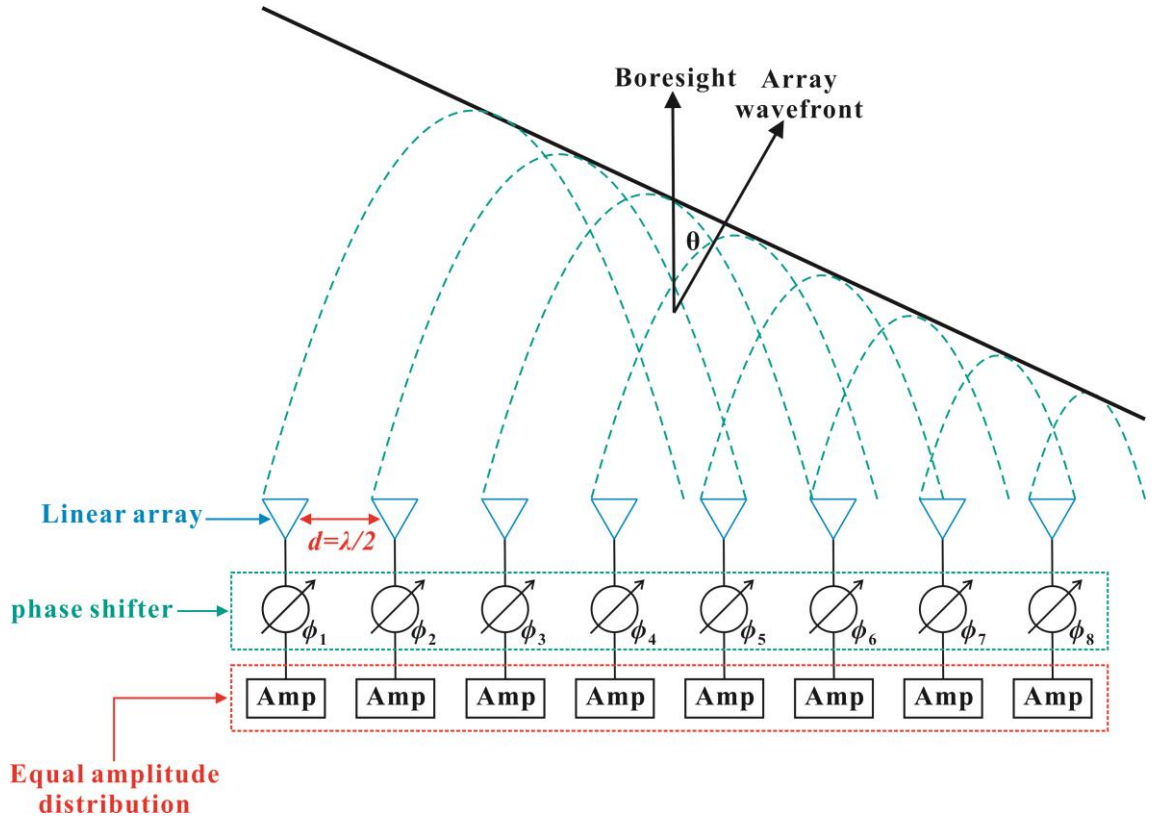


圖 9 調整相位應用於相控陣列天線架構圖

圖 9(a)顯示出了在兩個相鄰的陣列天線單元之間應用了直角三角形特性，並分析陣列天線單元的間距 d 、波束轉向偏離的角度 θ 與地平線夾角 φ 的關聯性。在圖 9(c)可觀察出 $\theta + \varphi = 90^\circ$ ，由於控制波束時間的延遲等於波面穿越距離 L 的所需時間，使波傳播的距離 $L = d \sin(\theta)$ 。波傳播的距離 L 視為波長的一部分，則可使用相位延遲代替時間延遲如式(12)

$$\Delta\psi = \frac{2\pi d \sin\theta}{\lambda} \quad \text{式 (12)}$$

因本章所設計陣列天線如圖 3.10 的間距為 $\frac{\lambda}{2}$ ，則式(12)可簡化為式 (13)

$$\Delta\psi = \pi\sin\theta$$

式 (13)

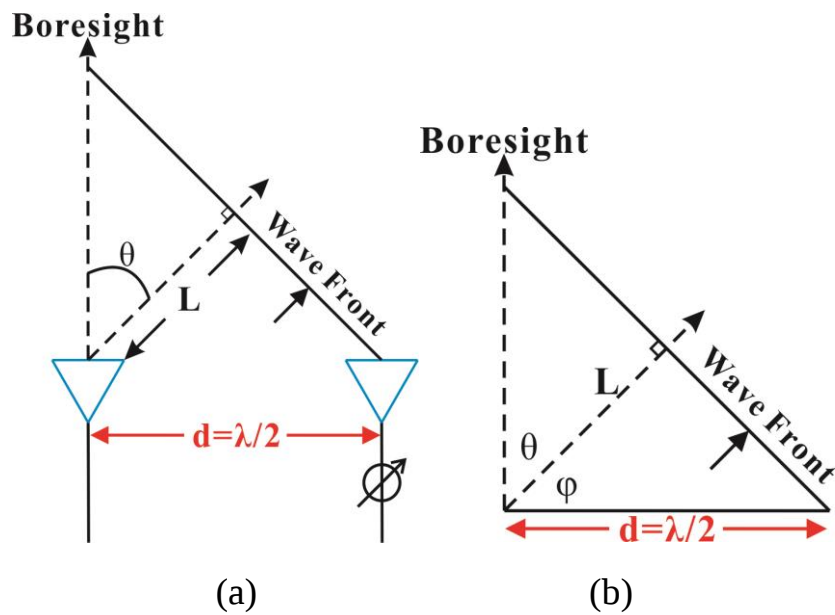


圖 10 相移角 $\Delta\psi$ 與波束轉向角示意圖

(a)兩個相鄰的陣列天線單元應用直角三角形特性 (b) θ 與 ψ 的夾角

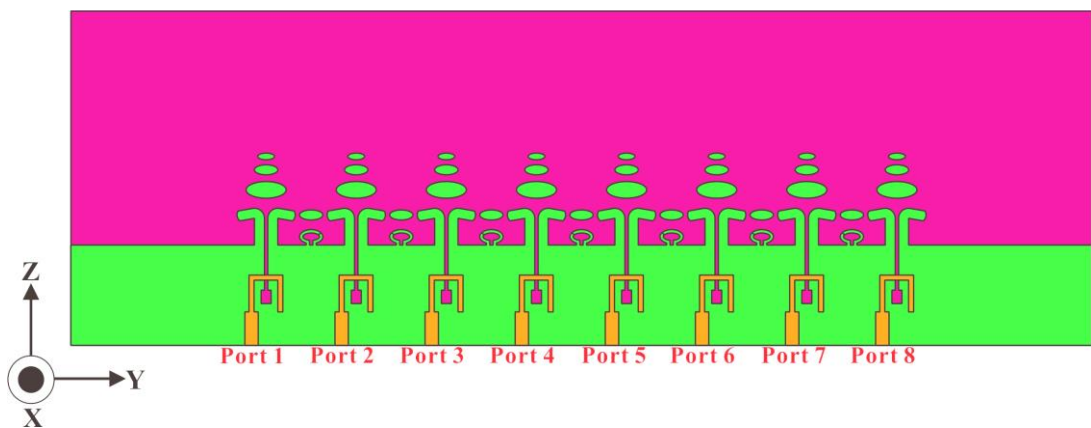


圖 11 計畫團隊先期規畫之平面式八木線性陣列天線結構圖

若計畫團隊先期規劃所設計的平面式八木陣列天線做參考，在天

線單元間距 d 為 5.4 mm ($\approx \lambda/2$)，在 28 GHz 達到主波束偏移 30° 的條件帶入式(3.12)，可得出 $\Delta\psi = 1.66, \text{rad} = 90^\circ$ 。若在模擬軟體使圖 3.10 每個天線單元相位相差 90° ，則可以得出圖 3.11 主波束角度偏移 30° ，若主波束偏移 45° 則須使每個陣列天線單元的相位相差 135° ，也可從圖 3.12 觀察到天線單元間距 d 、主波束偏移角度和每個陣列天線單元相位差的趨勢。

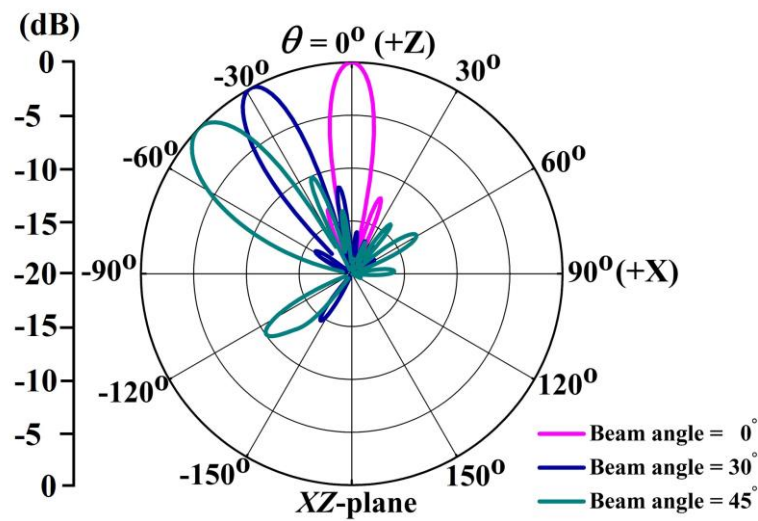


圖 12 數值模擬陣列天線單元相位差使主波束角度偏移正
規化 2D 輻射場型圖

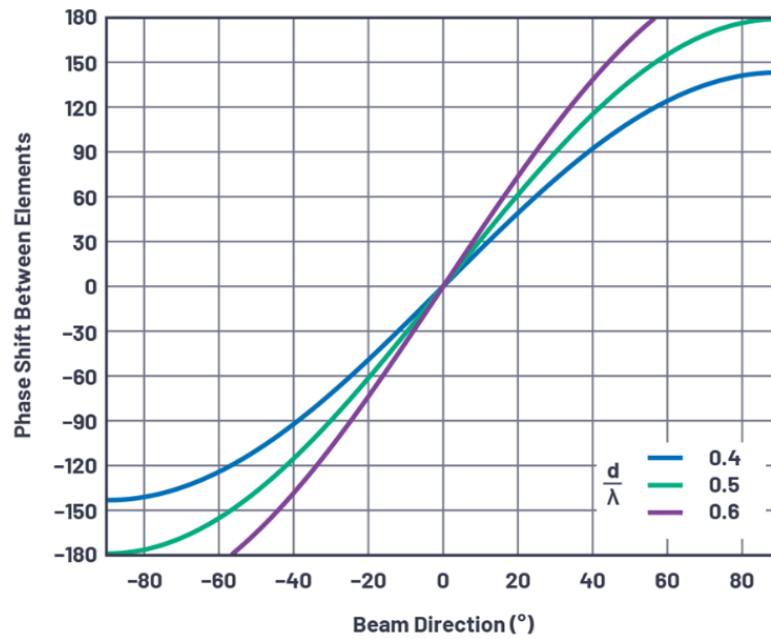


圖 13 陣列天線單元間距、相位差和波束角度趨勢圖

【線性陣列的陣列因數】

在相控陣列天線中，可以透過計算陣列天線單元之間的相位差而達到最佳指向性。其中有兩個主要的關鍵參數，首先為陣列天線裡每個獨立單元的增益稱為單元因數(GE)，第二個為多組天線單元所形成的陣列天線稱為陣列因數(GA)。[圖 13](#)陣列天線的增益和場型是由單元因素和陣列因素相乘得出，若單位為 dB 則相加得出式(14)

$$G(\theta) = G_E(\theta) + G_A(\theta) \quad \text{式(14)}$$

其中單元因數(GE)為單天線單元的輻射場型圖，而單天線單元的共振形式及幾何結構圖則會影響該天線的的輻射場型及增益。陣列因數(GA)為天線單元進行排列所組成的陣列，其中關鍵參數為天線單元之

間的間距、振幅和相位，假設陣列因子的天線單元呈現等間距分佈和相同振幅及相位差，正規化後的陣列因素式(15)

$$AF[0] = \frac{\sin\left(\frac{N\pi d}{\lambda}[\sin(\theta) - \sin(\theta_0)]\right)}{N\sin\left(\frac{\pi d}{\lambda}[\sin(\theta) - \sin(\theta_0)]\right)} \quad \text{式(3.15)}$$

其中 θ_0 為波束角度會根據天線單元之間的相位差而移動($\Delta\varphi$)，因此將式(15)整理成式(16)

$$AF[0, \Delta\varphi] = \frac{\sin\left(N\left[\frac{\pi d}{\lambda}\sin(\theta) - \frac{\Delta\varphi}{2}\right]\right)}{N\sin\left(\frac{\pi d}{\lambda}\sin(\theta) - \frac{\Delta\varphi}{2}\right)} \quad \text{式 (3.16)}$$

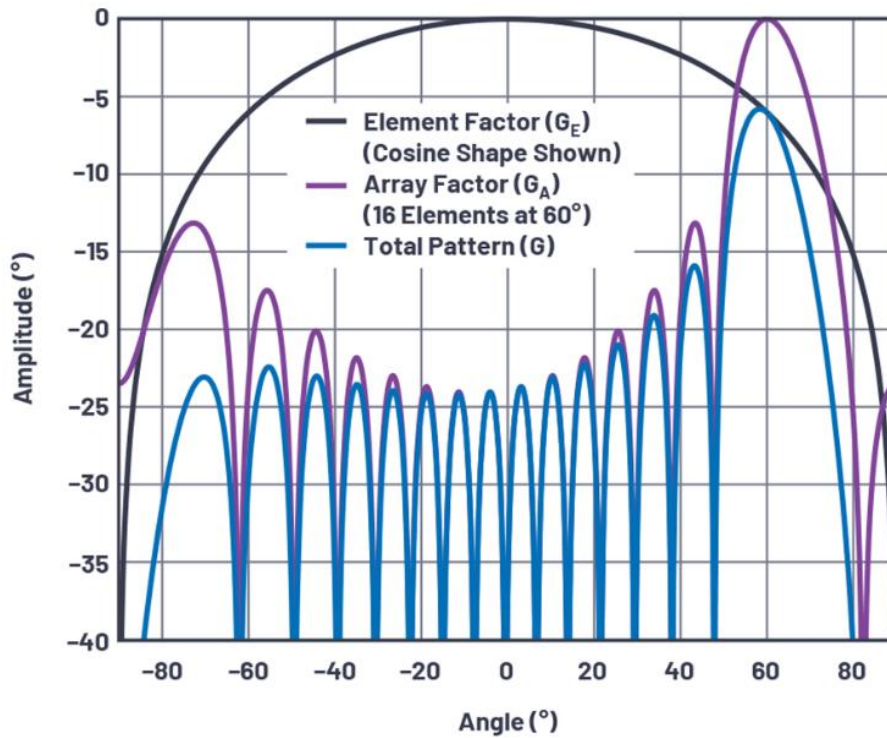


圖 14 天線單元因素和陣列因素所結合的輻射場型圖

若將陣列天線單元數量 N 分別使用 8、16 及 32 組使形成陣列天線，圖

14 可觀察到對於平面式的線性陣列，無論幾組天線單元的旁波瓣位準 (sidelobe level) 都位於 -13 dB 的水平，而半功率波束寬隨著天線單元數的增加而減少，旁波瓣及零點的數量也會隨著天線單元的增加而遞增。圖 15 顯示了將 32 組天線單元使用相位差導致主波束角度偏移 30° 及 60° ，並觀察到旁波瓣位準及半功率波束寬隨著主波束偏移的角度而增加。

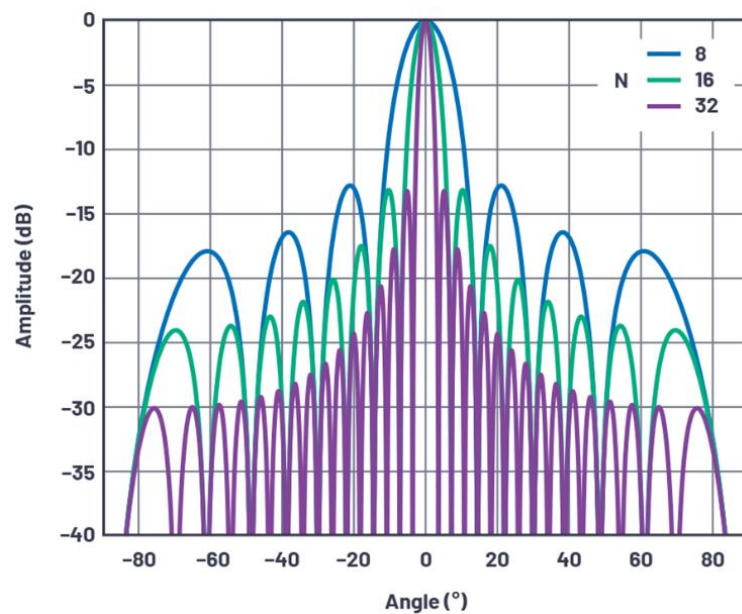


圖 15 天線單元為 8、16 和 32 組形成的線性陣列天線正規化

輻射場型圖

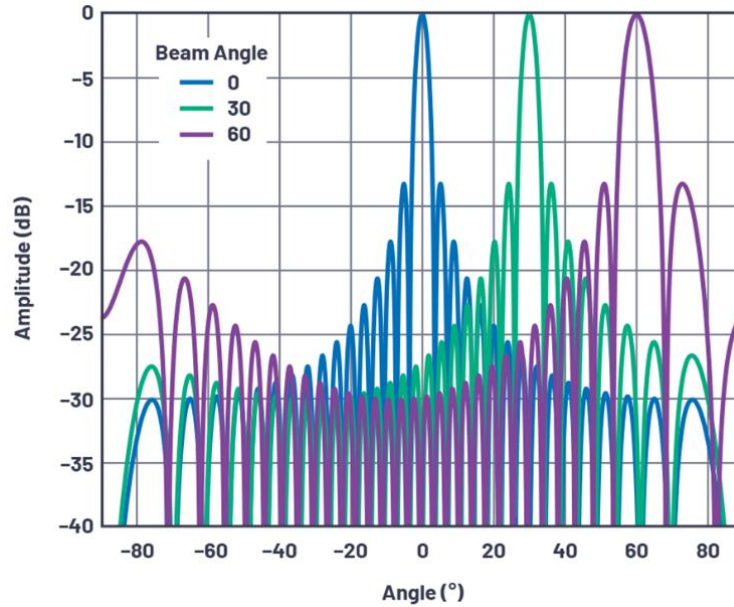


圖 16 天線單元為 8、16 和 32 組形成的線性陣列天線正規化

輻射場型圖

【波束寬度】

在陣列天線的設計中，通常都會使用半功率波束寬(HPBW)和第一零點波束寬(FNBW)來衡量陣列天線的性能。半功率波束寬的定義為增益峰值向下 3 dB 的波束寬度，若以本章所設計平面式八木天線的 8 單元陣列天線如圖 10，天線單元數量 $N = 8$ 和間距 $d = \lambda/2$ ，將半功率波束寬(3 dB or $1/\sqrt{2}$)帶入正規化後的陣列因數方程式如式(17)

$$\frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{\sin\left(8\left[\frac{\pi\lambda}{2\lambda}\sin(\theta) - \frac{\Delta\varphi}{2}\right]\right)}{8\sin\left(\frac{\pi d}{\lambda}\sin(\theta) - \frac{\Delta\varphi}{2}\right)} \quad \text{式 (17)}$$

得出 $\Delta\varphi = 0.35$ ，並代入式(18)

$$\Delta\psi = \frac{2\pi d \sin\theta}{\lambda} \quad \text{式(18)}$$

得出 $\theta = 0.11, rad = 6.4^\circ$ ，而半功率波束寬為增益峰值兩側-3 dB 的角度，所以得出半功率波束寬為 12.8° ，使用電磁模擬軟體將本團隊所設計平面式八木線性陣列天線的結果得出圖 16 半功率波束寬為 12.64° ，數值與公式計算相近。也可利用式(17)計算出第一零點的波束寬，將陣列因數($AF = 0$)代入式(17)可得出第一零點為 28.5° 也與模擬結果的第一零點 28° 相近，以上差異的部分可能為單一天線幾何結構的輻射場型所導致。

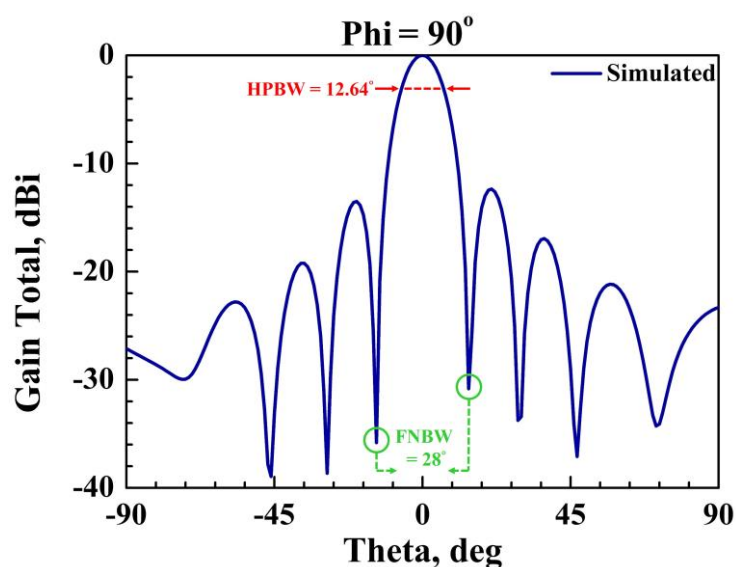


圖 17 模擬平面式八木線性陣列天線正規化輻射場型圖

第三章 研究分析與探討

本案研究架構包含(1) 同軸巴倫饋入設計、(2)陣列子天線設計、(3)波束成型探討，首先本團隊所提出的陣列天線必須集成巴倫電路，

再結合平面式八木天線圖 19 為透過調整饋入位置朝-Z 方向移動，並將原有的 $\lambda_g/4$ 短路槽孔線(short-circuited slot line)分為槽孔線(slot line)和短路截線(shorted stub)。由於截斷接地面寬度 W_{GND} 使槽孔線(slot line)阻抗過高，而短路截線(shorted stub)的加入可使微帶線饋入時，將槽孔線(slot line)與短路截線(shorted stub)視為並聯電路如圖 17，等同於將高阻抗經過並聯轉換為接近 50Ω 的低阻抗，進而達成良好的阻抗匹配。最後使用史密斯圖 18 對槽孔線(slot line)與短路截線(shorted stub)做了探討與分析，首先 Ant 1_a 的結構僅有槽孔線(slot line)，中心頻率(28 GHz)於史密斯圖上呈現 $(113 - j89)\Omega$ 的高阻抗，最後加入短路截線(shorted stub)和槽孔線(slot line)使微帶線饋入時視為並聯電路，使 Ant 1 (proposed)中心頻率於史密斯圖呈現 $(46 - j2.78)\Omega$ 的阻抗，證明短路截線(shorted stub)的加入可使用並聯電路的特性將高阻抗轉換為接近 50Ω 的低阻抗，進而獲得良好的阻抗匹配。圖 19 顯示單天線單元之平面式八木天線的幾何結構圖，該天線設計於 Rogers RT/Duroid 5880 基板的兩側(高度 $h = 0.508\text{ mm}$ 、介電系數 $\epsilon_r = 2.2$ 和介電損耗 $\tan \delta = 0.0009$)。基板正面由平面式偶極天線做為輻射器(driver)，三個寄生圓做為導波器(director)，而截斷的接地面做為反射器(reflector)所形成平面式八木天線。為了使偶極天線發射的波與截斷接地面反射的波同相位進而減少背後輻射，必須將偶極天線與截斷接地面之間的距離設定為 $\lambda_g/4$ (λ_g = 偶極天線操作波長)。圖 20 顯示模擬單天線單元之平面式

八木天線的反射係數，達到阻抗匹配機制所示，於 5G FR2 n261 band 獲得良好阻抗匹配，模擬頻寬為 15.6% (25.8-30.2 GHz)。圖 21 顯示了模擬了單天線單元之平面式八木天線的 2D 輻射場型圖並顯示於 XZ-plane 與 YZ-plane，半功率波束寬分別為 106° 和 69° ，圖 22 顯示了模擬於 5G FR2 n261 band 平均增益為 7.02 dBi。

(3-1) 同軸巴倫饋入設計

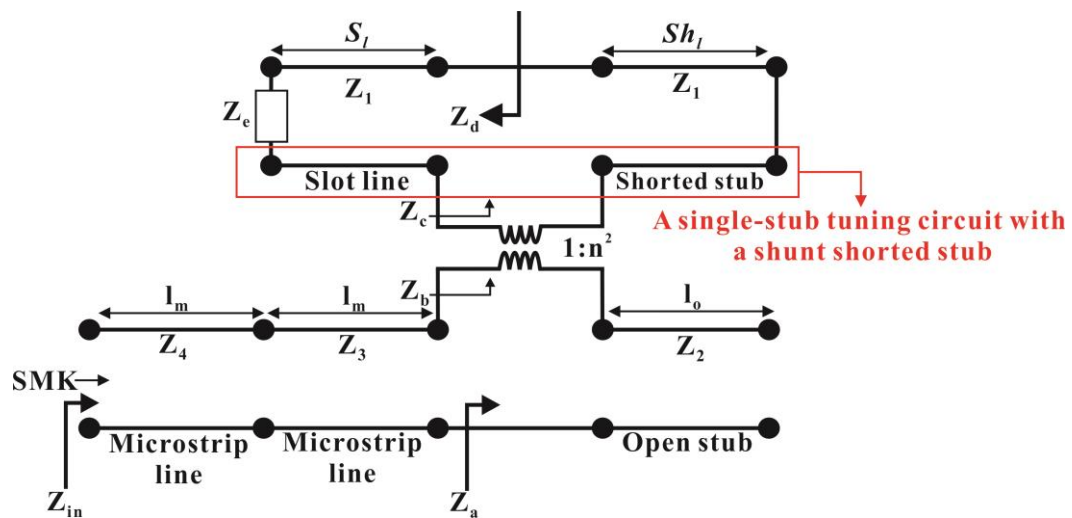


圖 18 集成巴倫(Balun)之等效電路圖

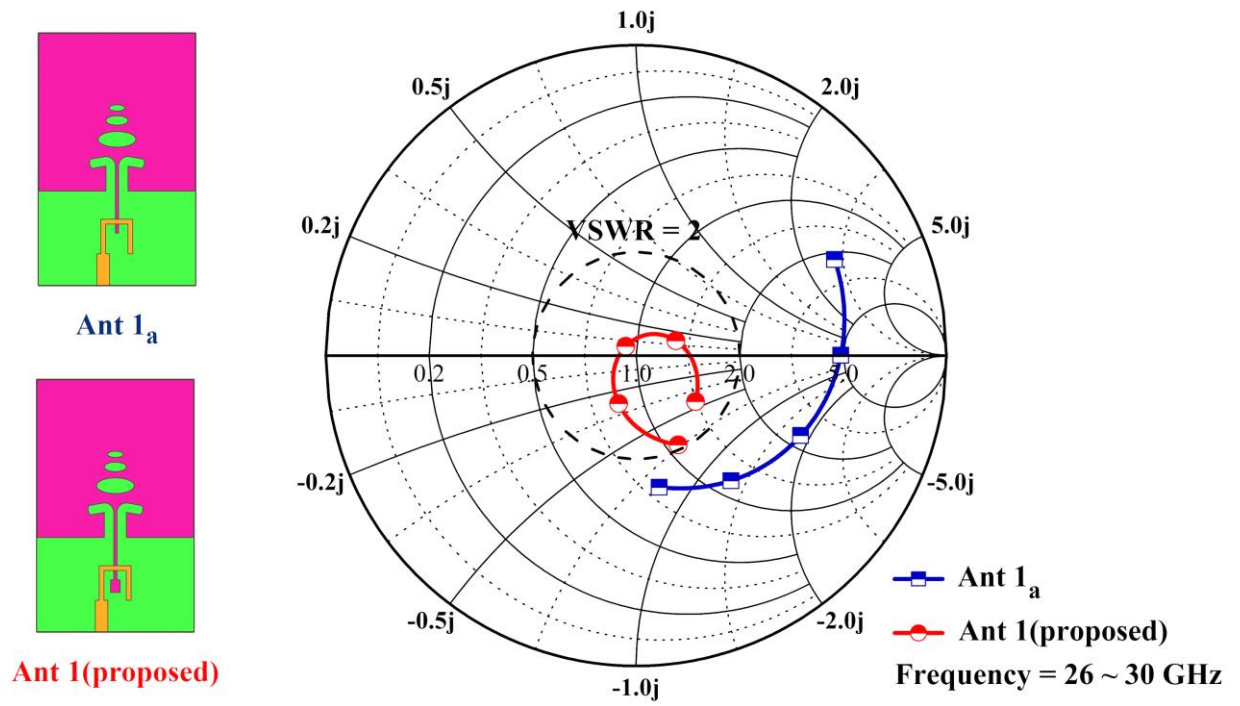


圖 19 結構分析之輸入阻抗史密斯圖

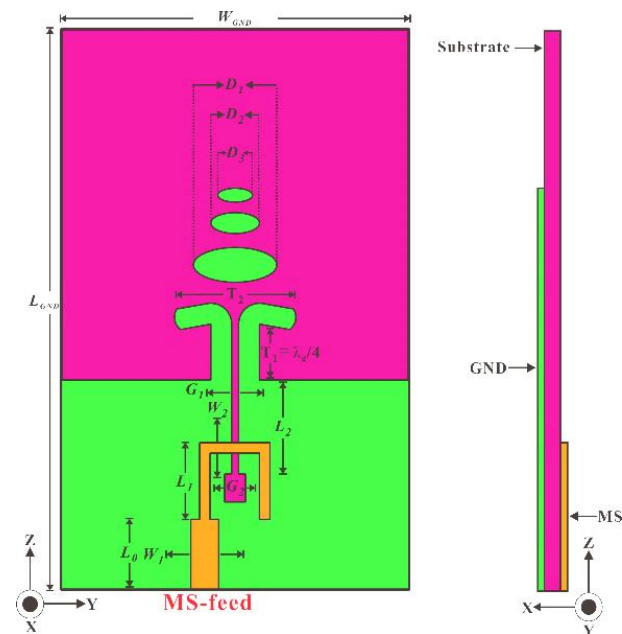


圖 20 天線單元之平面式八木天線幾何結構圖

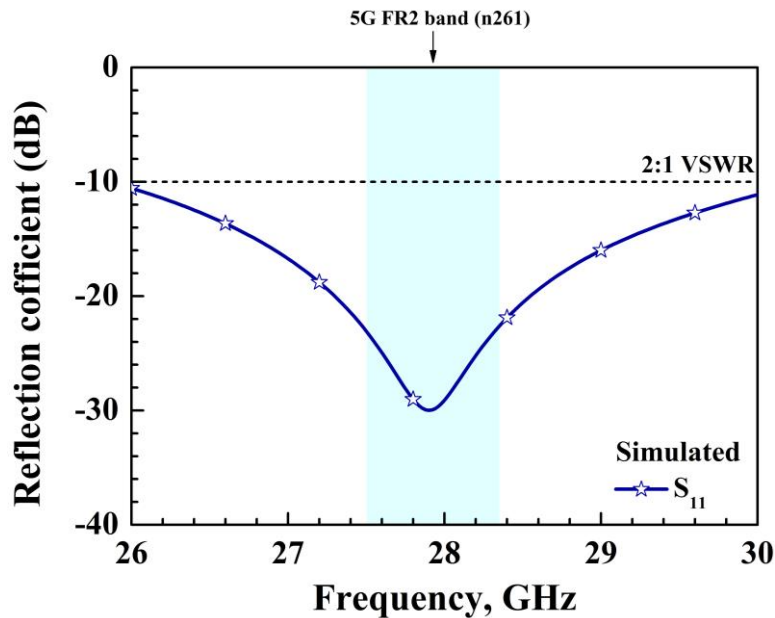


圖 21 模擬單天線單元之平面式八木天線反射係數圖

(3-2) 陣列子天線設計

在平面式線性陣列天線設計時，為了獲得良好的波束成型特性，通常會在天線單元之間選擇半波長的間距以獲得最佳的波束成型性能，這是由於陣列天線單元間距增加至 0.75λ 或是 1λ 時應用於波束成型會產生較大的旁波瓣位準和光柵波瓣。為了獲得較寬的波束掃描角度及減少天線單元的相互耦合效應，本章在所提出天線單元之間加入解耦的結構，使各個天線單元在間距 0.5λ 的情況下均可獲得較低的相互耦合特性。圖 21 顯示了雙天線單元之平面式八木天線的中心距離加入寄生式 Loop 做為解耦結構，以橢圓形週長計算公式得知寄生式 Loop 週長為 3.6 mm。在寄生式 Loop 雙下地之間支線的間距等效於散佈式電容，寄生式 Loop 下地至接地面等效於散佈式電感，該等效電路形成帶拒濾波器。圖 22 顯示出了雙天線單元之平面式八木天線在 5G

FR2 n261 band 相互耦合係數($S_{12} < -15$ dB)，而加入了寄生式 Loop 等效於 LC 帶拒濾波器電路，頻率響應於 27 GHz，可使該頻率分量衰減到極低水平進而減少天線單元之間的相互耦合，有效的改善了兩單元之間的相互耦合效應($S_{12} < -25$ dB)。圖 23 顯示出模擬 Port 1 激發時表面之電場強度分佈，圖 23(b)可觀察出寄生式 Loop 所形成的帶拒濾波器可有效的抑制 Port 1 所激發的電場耦合至 Port 2，減少了 Port 2 偶極臂的表面電場強度，有效的減少兩天線單元之間的相互耦合效應。圖 24 顯示出模擬 Port 1 激發時表面之電場向量分佈，可看出圖 24(a)無寄生式 Loop 因較大的互耦特性導致電場牢固的耦合在兩個偶極臂之間，振幅較大且與其他區域的電場向量不同，兩單元之間的區域僅存在+Z 方向的電場分量，且波都在±Y 方向傳播，這會導致當 1×2 的天線單元增加至 1×8 陣列天線時應用於波束成型產生輻射場型及增益的影響。圖 25 為具有寄生式金屬指向器的雙天線單元之平面式八木天線幾何結構圖，寄生式金屬指向器的設計可提升天線增益特性，圖 26 顯示出 Port 1 及 Port 2 激發於 28 GHz 時表面電場強度分佈。從圖 26(b)觀察出寄生式金屬指向器可使兩個八木天線單元的場耦合增加，使輻射到空間的電磁波通過寄生式金屬指向器將兩個天線單元平面波疊加，此寄生式金屬指向器的設計應用於多組天線單元所形成的陣列天線時，可提升增益及指向性。

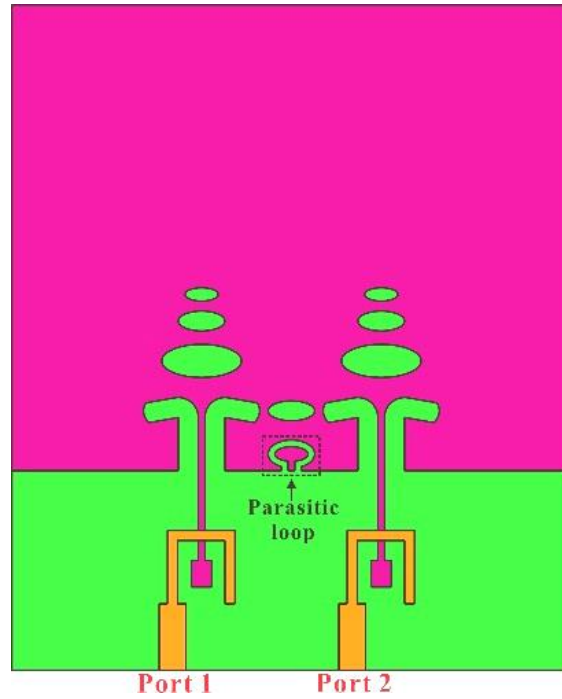


圖 22 具有寄生式 Loop 的雙天線單元之平面式八木天線幾何結構圖

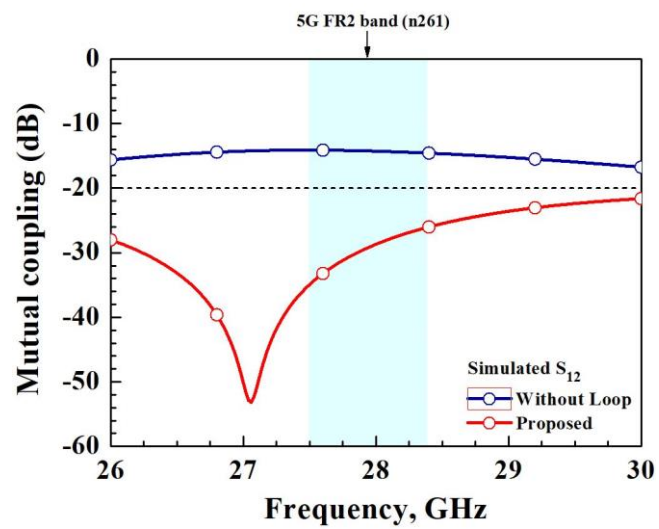


圖 23 模擬有無寄生式 Loop 於雙天線單元之平面式八木天線的相互耦合係數圖

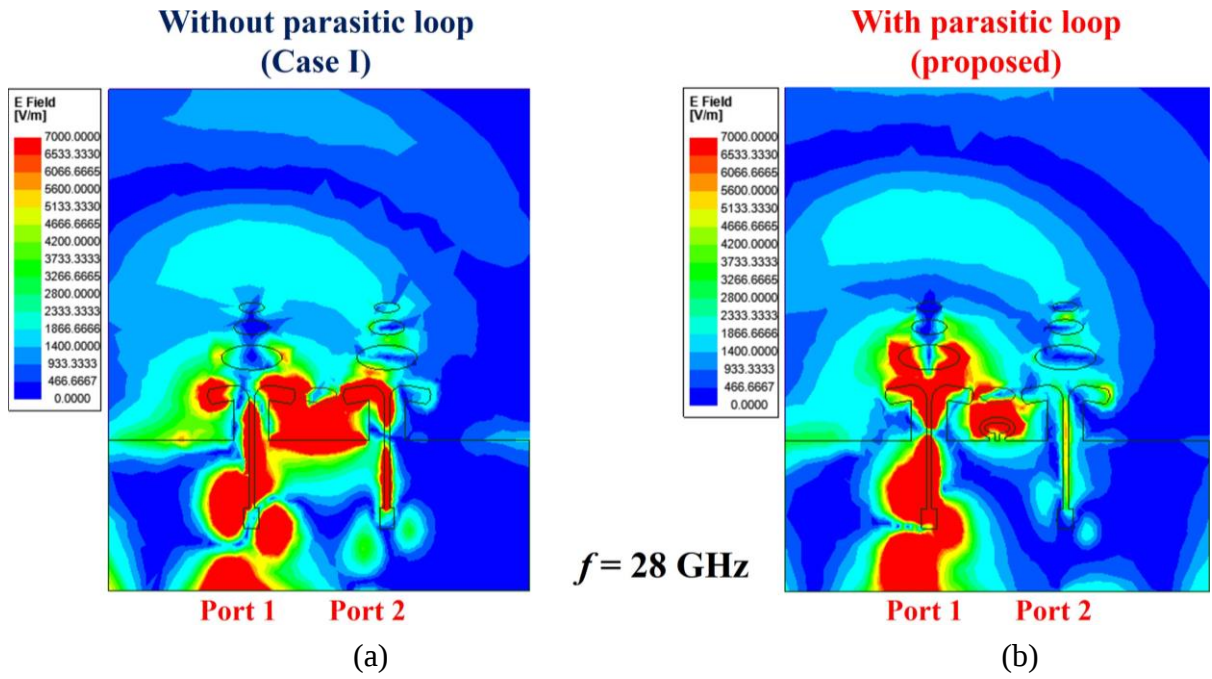


圖 24 模擬 Port 1 激發於 28 GHz 時表面電場強度分佈圖

(a) 無寄生式 Loop (b) 具有寄生式 Loop

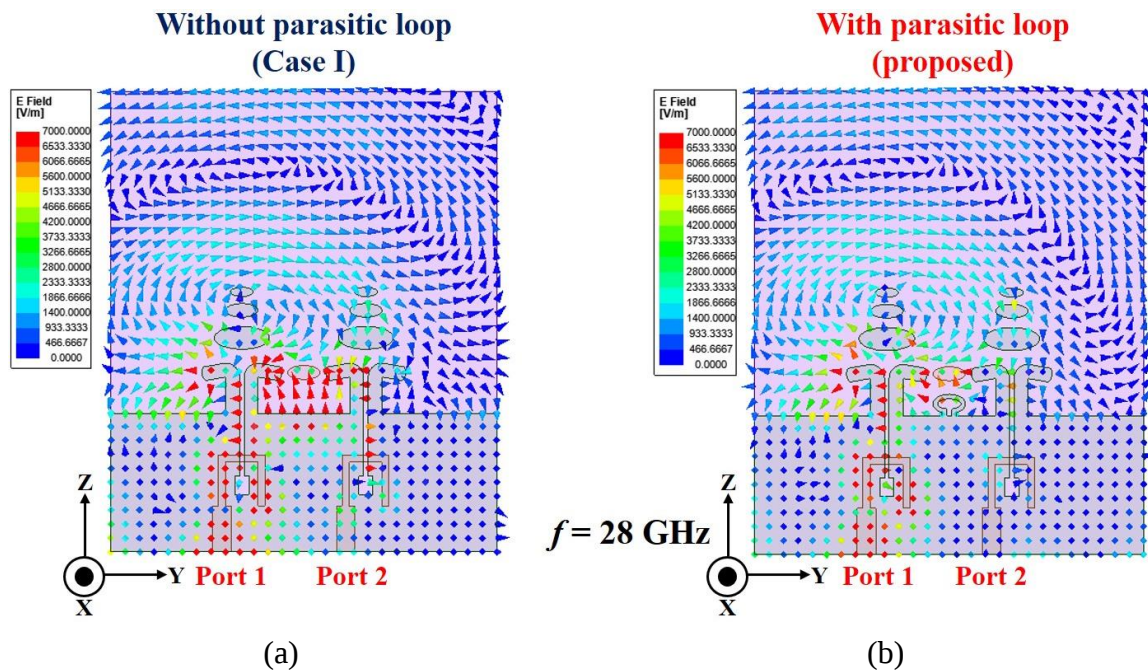


圖 25 模擬 Port 1 激發於 28 GHz 時表面電場向量分佈圖

(a) 無寄生式 Loop (b) 具有寄生式 Loop

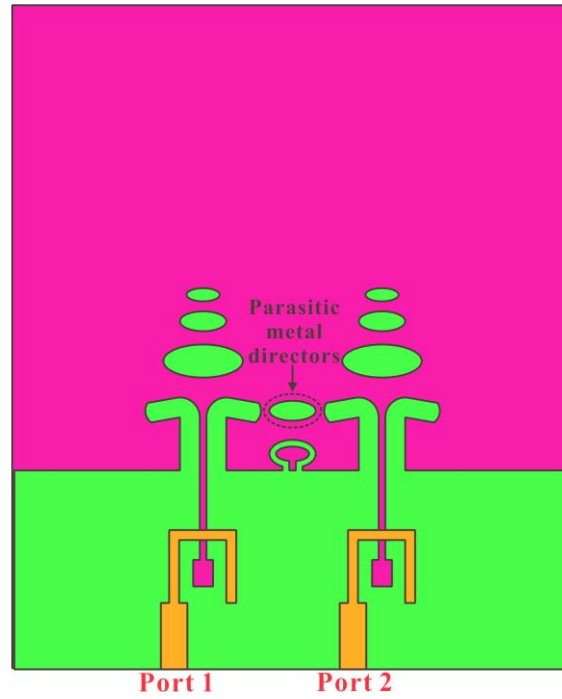


圖 26 具有寄生式金屬指向器的雙天線單元之平面式八木天線

幾何結構圖

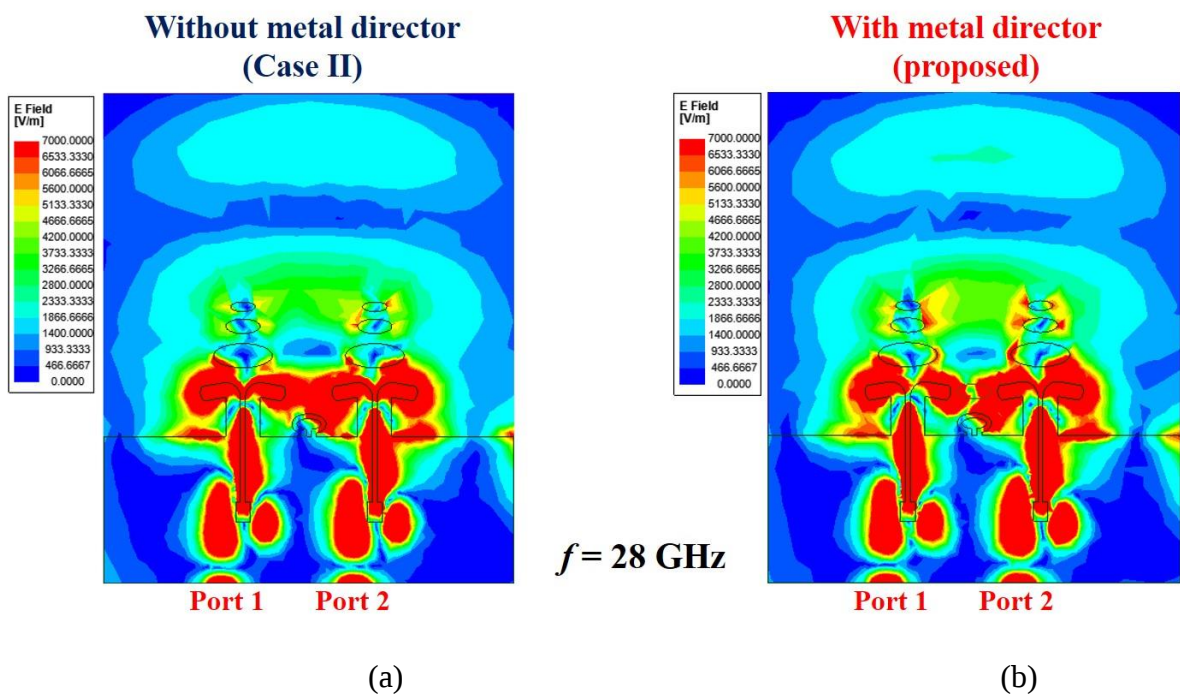


圖 27 模擬 Port 1 及 Port 2 激發於 28 GHz 之表面電場強度

分佈

(a)無金屬指向器 (b)具有金屬指向器

(3-3) 波束成型探討

本計畫先期研究將平面式八木天線形成八個天線單元的線性陣列天線，相鄰天線單元的間距為半波長(5.4 mm)如圖 27，並使用模擬軟體(Ansys HFSS)模擬具有寄生式 Loop 及無寄生式 Loop 比較在陣列天線上應用波束成型的性能。陣列由八個相同振幅的埠饋入，並讓每個埠相位不同使形成相位差，讓主波束達到偏移的效果。圖 28(b)可看出由於加入了寄生式 Loop 而降低了相鄰天線單元之間的相互耦合，與圖 28(a)無寄生式 Loop 相比，所提出天線應用在波束成型可獲得較高的增益及較低的旁波瓣位準，使毫米波陣列掃描角度(scan angle)的性能大大增加。八天線單元之平面式八木線性陣列天線在 28 GHz 掃描角度至 -55° 的情況下，具有寄生式 Loop 的八天線單元之平面式八木線性陣列天線增益為 13.1 ~ 14.6 dBi，而旁波瓣位準(SLL)為 -8 ~ -12.3 dB。無寄生式 Loop 的八天線單元之平面式八木線性陣列天線增益為 8.7 ~ 14.6 dBi，而旁波瓣位準(SLL)為 -4.7 ~ -12.25 dB。以上數據分析可觀察出，減少陣列天線單元之間相互耦合的效應，使應用於波束成型圖 29 可有效的增加掃描角度的性能，並整理為表 1 先行分析有無寄生式 Loop 之掃描角度比較。

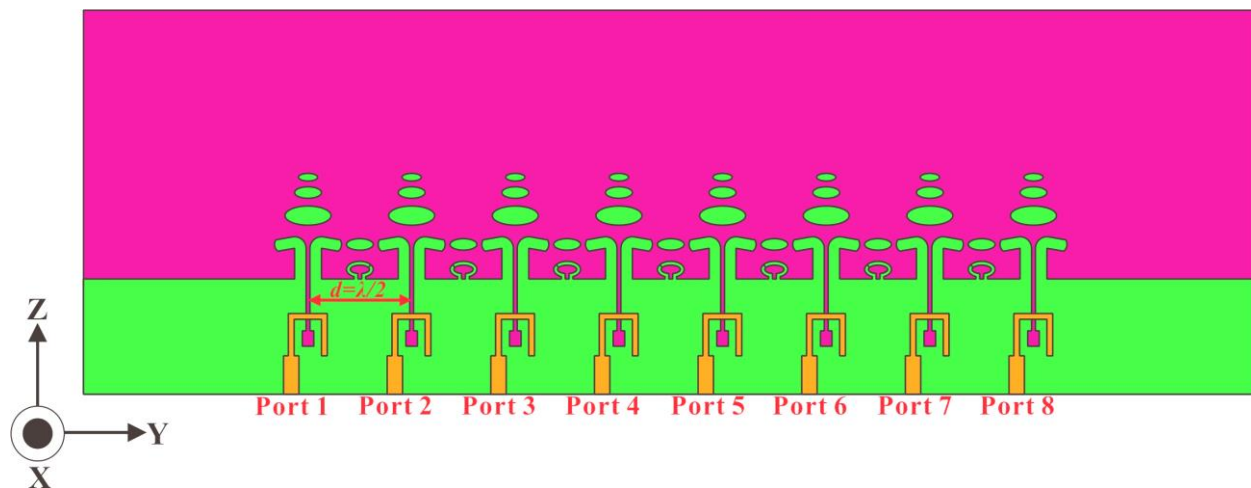


圖 28 八天線單元之平面式八木線性陣列天線幾何結構圖

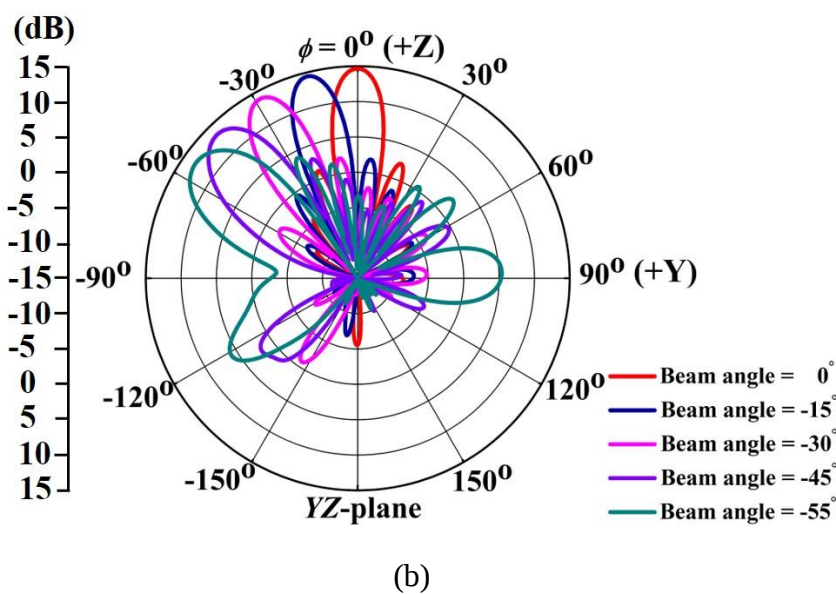
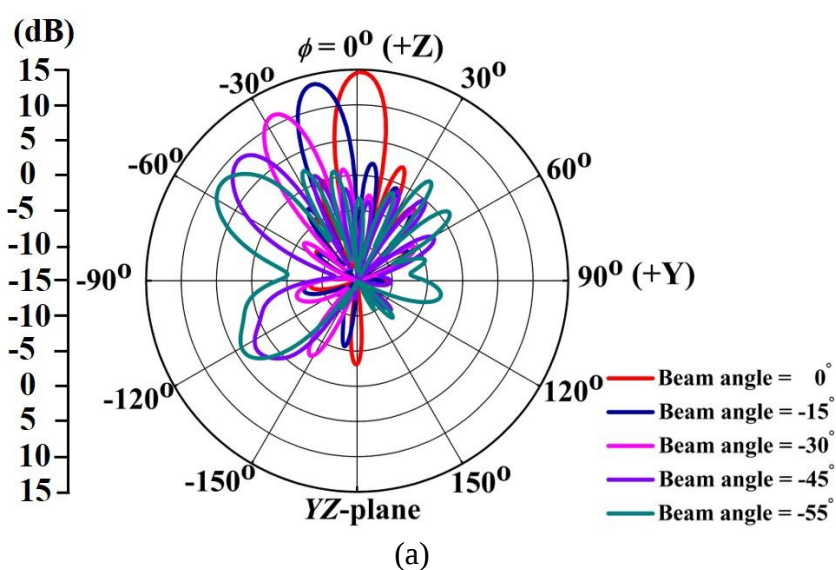


圖 29 八天線單元之平面式八木線性陣列天線波束成型 2D 輻射場型圖

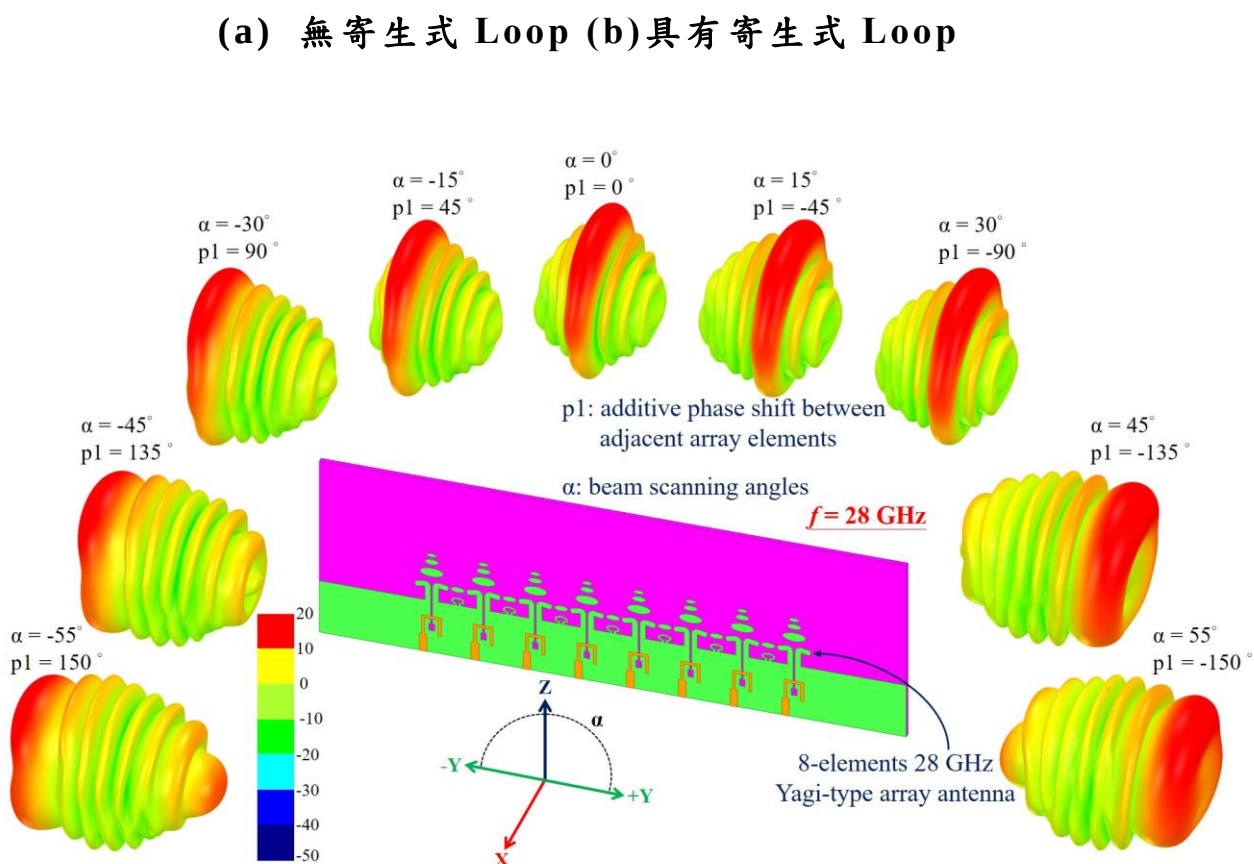


圖 30 八天線單元之平面式八木陣列天線波束成型 3D 輻射場型圖

表 1 有無寄生式 Loop 之掃描性能比較表

Simulated		None	With parasitic loop
28 GHz	Beam angle	$0^\circ \sim -55^\circ$	$0^\circ \sim -55^\circ$
	Sidelobe level (dB)	$-4.7 \sim -12.25$	$-8 \sim -12.3$
	Gain (dBi)	$8.7 \sim 14.6$	$13.1 \sim 14.6$

本研究計畫已經透過在軍事教育中投入陣列天線與相控陣列天線

之間的原理實踐，透過相控陣列的公式分析毫米波於波束成形的應用，透過公式計算出主波束偏移角及相鄰天線單元所需的相位差。在單天線單元之平面式八木天線分析集成巴倫饋入與阻抗匹配的機制，並在雙天線單元之平面式八木天線透過解耦的結構減少兩個相鄰天線單元之間的相互耦合效應(預計需達 $\text{Mutual coupling} < 25 \text{ dB}$)。接下來透過減少陣列天線單元之間的相互耦合效應，將八天線單元之平面式八木線性陣列天線應用於波束成型，期望達到輻射場型呈現了最大波束掃描角度為 110° (寬波束)，增益皆高於 13 dBi 而旁波瓣位準皆小於 -8 dB 。

第四章 預期效益與對軍事教育改革潛力

本研究將對參與人員(包含學生)執行<結合理論與實踐之高增益線性陣列設計開發教學>，參與人員可獲得之訓練效益如下：

- (1) 在理論分析方面，參與本研究之工作人員將可獲得高增益線性陣列天線之設計，進行電磁特性研究與分析與模擬能力、微波電路於目標結構建模能力、共振電流分析能力、數值方法及綜合分析等相關訓練。
- (2) 在軟體方面，參與本研究之工作人員將可使用電磁模擬軟體、電磁實驗資料蒐集運算等相關軟體設計開發之訓練。
- (3) 在整合方面，參與本研究之工作人員將可獲得高增益線性陣列天線特性研究與設計分析能力、軟硬體整合與系統整合之相關訓練。
- (4) 在分析原理方面，參與研究之工作人員將可藉由高增益線性陣列天線進行電磁特性研究與分析分法獲得有關天線參數分析及微波工程等相關學理之訓練。
- (5) 在軟體應用方面，參與本研究之工作人員將可獲得電磁模擬軟體之建模、設定、與分析流程，結果統計分析等相關訓練。

本研究成果將對適用於高增益線性陣列天線設計與特性分析，通過理論學習和實踐操作，鼓勵學生探索天線設計的新方法，包括結構優化、材料選擇、多功能集成...等，促進學生對軍事通信技術的深入理解，並激發他們在天線設計領域的創新思維，有助於國內進行國防自主與科技發展之重要參考，且運用軍事教育投資現有的設備與實驗室，提供學生了解微波電路理論與天線設計之聯結性應用，可通過參與實際的設計和製作過程，案內編組人員與學生將獲得寶貴的實踐經驗，這對於未來在軍事技術領域的職業發展至關重要，本研究計畫不僅有助於提升學生的創新能力和實踐技能，也將為軍事教育改革提供新的思路和方法。透過這種以實踐為導向的教學模式，學生將更好地準備迎接未來軍事技術領域的挑戰。

第五章 結論與未來展望

本研究透過結合理論與實踐的教學模式，全面提升了參與人員對高增益線性陣列天線設計的認知與技能，實現了從理論學習到實作應用的有效轉化。研究涵蓋的範疇廣泛，從電磁特性研究、微波電路建模，到共振電流分析、軟體模擬與系統整合等，參與人員無論在學術層面還是技術實作上，都獲得了全方位的訓練。

在理論層面，研究所提供的設計與分析訓練，加深了參與人員對天線設計中各項物理機制的理解，尤其是在電磁波的特性與傳播路徑方面有了更具體的掌握。此外，透過數值方法和軟體工具的應用，參與人員能夠進行更精細的天線性能模擬與優化，從而提升了天線設計的精度與效率。這些技能的提升不僅有助於軍事通信系統的進步，還能應用於各種需要高效、可靠通訊技術的國防科技領域。

在實踐層面，研究強調實際操作與系統整合的重要性。參與人員在研究過程中，不僅學習了如何使用專業的電磁模擬軟體進行天線的性能分析，還能在實際的天線製作和測試環節中，進一步驗證其理論設計的可行性。這樣的雙向學習模式，能讓參與者在理論與實作之間找到平衡，培養他們面對未來技術挑戰時的應變能力與問題解決能力。

總體來看，本研究計畫為學生和專業教師提供了寶貴的學習成果，並在軍事技術的發展上，打下了堅實的基礎。通過此類研究，國內的軍事技術人才將在實務經驗和理論深度方面得到全面培養，進一步推動國防自主政策的實現。研究成果在天線設計領域的貢獻，對國內的軍事通信與相關技術發展具有重要參考價值，也為未來國防產業提供了強大的技術支援。

展望未來，本研究將繼續深化對高增益線性陣列天線設計的創新探索。隨著新興科技的發展，天線設計的需求越來越多樣化，因此未來的研究將著眼於多功能天線的開發，特別是結構優化與材料創新。高增益天線在現代戰場中扮演著關鍵角色，隨著敵對方電子對抗手段的日益複雜，具備高度抗

干擾性能且具有多功能整合的天線需求將更加迫切。未來研究將重點探索如何通過材料科學的突破來提高天線的性能，例如使用新型複合材料來降低天線的重量，同時提升其耐用性與效能。

此外，電磁模擬技術的進一步發展，將為天線設計提供更為精確的數據支持。未來，研究團隊將考慮引入更多先進的模擬技術。這不僅可以大幅縮短設計周期，還能提高設計的精確性與可行性，降低實驗成本與時間。在國防工業中，這種高效的設計流程將有助於加速新型天線的研發，並迅速將其應用於實際軍事任務中。

在教育與訓練方面，本研究未來將進一步深化教學模式，並推動更多跨領域的合作。例如，與電子工程、材料科學和人工智能領域的學者和研究人員合作，讓學生在天線設計的同時，也能接觸到不同領域的前沿技術。這種跨學科的學習與合作，不僅能提升學生的知識廣度，也能激發他們的創新能力，使其具備更強的競爭力，能夠應對未來軍事科技發展的多重挑戰。

軍事技術的快速發展，對於具備實作能力的高階技術人才需求日益增長。因此，未來的研究計畫還將著重於培養更多具有實際操作經驗的技術人員，通過更多實驗性課程與實習機會，讓學生在實際操作中學習和成長。此外，研究團隊計畫與國內外軍事研究機構進行更多合作，將國際前沿技術引入本地，進一步提升國內軍事技術的水準與競爭力。

最後，隨著「國防自主」政策的推進，研究將繼續為國內軍事產業提供堅實的技術支撐。透過結合創新技術與實踐應用，未來的研究成果不僅將應用於國防通信技術，還將延伸至更多國防領域，如無人機技術、電子對抗系統等。這些技術的進步將有助於強化國防能力，並為未來戰場上的勝利奠定基礎。研究團隊將不懈努力，致力於推動軍事科技的持續發展，為國家安全提供強大的技術後盾。

第六章 計畫編組與計畫成果

表 2 計畫編組

112 年度國防部補助軍事院校教師從事學術研究案專案編組人員名冊					
計畫名稱：應用於穿戴式擴增實境裝置之內藏式多頻段天線設計研究					
項次	專案人員級別	人員所屬單位	姓名	職稱	職掌
1	計畫主持人	空軍航空技術學院 航空通訊電子系	廖家德	中校 副教授 兼系主任	本案計畫進度主持 並指導全般計畫執行。
2	共同主持人	高雄科技大學 光電所	陳華明	特聘教授	共同主持本研究計畫 與執行內容技術指導。
3	協同主持人	空軍軍官學校 航電系	陳建宏	上校 教授 兼系主任	校外專家學者給予 天線量測實驗專業指導
4	研究助理	空軍航空技術學院 航空通訊電子系	黃福隆	少校 講師	協助本案裝置整合 分析與系統整合議題探討
5	研究助理	空軍航空技術學院 航空通訊電子系	高嘉鴻	少校 講師	協助本案開發天線 S 參數與隔離度數值 量測實驗。
6	研究助理	空軍航空技術學院 航空通訊電子系	蔡坤城	少校 講師	協助量測高頻數據 分析與研討
7	研究助理	空軍航空技術學院 航空通訊電子系	蔡嘉益	少校 講師	辦理本案資料蒐集 分析及學術研究所 需工作。
8	研究助理	空軍航空技術學院 航空通訊電子系	何宗翔	上士 助教	辦理本案行政作業 與文書資料蒐整所 需工作。
9	二技班 學生助理	空軍航空技術學院 航空通訊電子系	胡毓真	二技學生	辦理本案行政作業 與量測作業所需整 備工作。
10	二技班 學生助理	空軍航空技術學院 航空通訊電子系	蘇咨頻	二技學生	協助本案相關量測 作業與實驗整備。
11	二專班 學生助理	空軍航空技術學院 航空通訊電子系	羅欽瑋	二專學生	協助本案相關數據 彙整與分析作業。
12	二專班 學生助理	空軍航空技術學院 航空通訊電子系	黃彥清	二專學生	協助本案相關數據 彙整與分析作業。

13	二專班 學生助理	空軍航空技術學院 航空通訊電子系	羅柚棋	二專學生	協助本案相關數據彙整與分析作業。
14	二專班 學生助理	空軍航空技術學院 航空通訊電子系	陳穎賢	二專學生	協助陣列單元量測定位作業與校正數據分析。
15	二專班 學生助理	空軍航空技術學院 航空電子工程科	鄭丞翔	二專學生	協助陣列單元量測定位作業與校正數據分析。
16	二專班 學生助理	空軍航空技術學院 航空電子工程科	陳凱睿	二專學生	協助本案相關量測作業與實驗整備。
17	二專班 學生助理	空軍航空技術學院 航空電子工程科	趙傑森	二專學生	協助本案相關量測作業與實驗整備。

表 3 計畫之執行進度甘特圖

月 份 工 作 項 目	一 一 三 年 一 月	一 一 三 年 二 月	一 一 三 年 三 月	一 一 三 年 四 月	一 一 三 年 五 月	一 一 三 年 六 月	一 一 三 年 七 月	一 一 三 年 八 月	一 一 三 年 九 月	一 一 三 年 十 月	一 一 三 年 十 一 月	一 一 三 年 十 二 月
A1.研究人員編組責任分工												
B1.資料搜集與方法研討												
B2.零件耗材採購												
B3.訂製品採購												
C1.高增益線性陣列天線 設計與分析												
C2. S 參數分析												
C3. 隔離度分析												
C4. 天線表面電流分析												
C5.增益、效率分析												
D1. 天線結構參數探討												
D2.實、虛部阻抗探討												
D3.阻抗轉換電路分析												
D4.匹配電路調整												
D5.實測驗證與分析												
E1.波束成型效果分析												
E2.相位合成探討												
E3. 陣列因子研討與分析												
E4.波束變換探討與分析												
E5.實驗數值彙整與分析												
E6.撰寫研究報告												
預定進度 (累積數)	8 %	16 %	25 %	33 %	42 %	50 %	58 %	66 %	75 %	83 %	92 %	100 %

另本案成果以參加 2024 第十五屆 IIIC(2024 IIIC International Innovation competition)國際創新發明競賽，並榮獲金牌。

來源網址 :<https://www.innosociety.org/m/404-1649-120879.php?Lang=zh-tw>

2024 IIIC Gold Medal Award List金牌得獎名單

SID	Country	Inventor	Organization	Invention
296975	台灣	Kuang-Hway Yih, Hsiao-Fen Wang, Hui-Yu Hu, Shang-Hsuan Yang, Hsiang-ming Hsueh	弘光科技大學/軒郁國際股份有限公司	The first patented natural plant sunscreen complex essential oil
297010	台灣	Hsiao-Fen Wang, Kuang-Hway Yih, Hui-Yu Hu, Shang-Hsuan Yang, Hsiang-ming Hsueh	弘光科技大學/軒郁國際股份有限公司	A natural plant whitening compound essential oil product that effectively fades spots and melanin
297124	台灣	CHEN YU-LUNG, LIN I-MIN, LIN MING-WANG, LIU PO-WEI, CHANG WEI-CHING	東豐纖維企業股份有限公司	Smart manufacturing contributes to carbon emissions management in the textile industry
300230	台灣	Chung-Wen Kuo, Tzi-Yi Wu, Ruoyu Wang, Zi-Hao Lin, Ke-Hong Chen, Zhuan-Min You	國立高雄科技大學	Synthesis of CoNxSyC-rGO composites as cathode catalysts for anion-exchange membrane fuel cells
304422	台灣	CHING PING WU, YI HAN LIN, CHIH YUN KANG, YU LIN G PAN	三軍總醫院附設民眾診療服務處	URINE COLOR IDENTIFICATION DEVICE
308754	台灣	Hsiao-Pin Lee, Hsiu-O Kao, Mei-Fang Liu, Chiang-Yi Chen, Chin-Hsing Pan, Min-Lun Hung	台灣大學醫學院附設醫院	Smart Safety Commode Chair
308757	台灣	Chun-Pin Chang, Xiao-Zhen Huang, Hong-Rui Wei, Hung-Wei Chang	嘉南藥理大學	Intelligence Symbiotic Water Cycling System
308768	台灣	Chia-Te Liao, Zhe-Kai Yang, Hua-Ming Chen, Ying-Yu Liao, Wei-Lung Wu, Yu-Rui Chen	空軍航空技術學院	A planar array antenna design for integrating vehicular networks and 6G communications

參考文獻

- [1] Wong, K. L., Hsiao, F. R., & Chiou, T. W. (2004). Omnidirectional planar dipole array antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 52(2), 624-628.
- [2] Bai, Y. Y., Xiao, S., Liu, C., Shuai, X., & Wang, B. Z. (2013). Design of pattern reconfigurable antennas based on a two—element dipole array model. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 61(9), 4867-4871.
- [3] Isbell, D. (1960). Log periodic dipole arrays. *IRE transactions on antennas and propagation*, 8(3), 260-267.
- [4] Hui, H. T. (2003). Improved compensation for the mutual coupling effect in a dipole array for direction finding. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 51(9), 2498-2503.
- [5] Cai, X., Geyi, W., & Sun, H. (2017). A printed dipole array with high gain and endfire radiation. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16, 1512-1515.
- [6] Hussain, S., Qu, S. W., Zhou, W. L., Zhang, P., & Yang, S. (2020). Design and fabrication of wideband dual-polarized dipole array for 5G wireless systems. *IEEE Access*, 8, 65155-65163.
- [7] Duffley, B. G., Morin, G. A., Mikavica, M., & Antar, Y. M. M. (2004). A wide-band printed double-sided dipole array. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 52(2), 628-631.
- [8] Parker, E. A., & El Sheikh, A. N. A. (1991). Convolutd dipole array elements. *Electronics letters*, 4(27), 322-323.
- [9] Neyamadpour, A., Wan Abdullah, W. A. T., Taib, S., & Neyamadpour, B. (2010). Comparison of Wenner and dipole—dipole arrays in the study of an underground three-dimensional cavity. *Journal of Geophysics and Engineering*, 7(1), 30-40.
- [10] He, J., Ahmad, M. O., & Swamy, M. N. S. (2013). Near-field localization of partially polarized sources with a cross-dipole array. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 49(2), 857-870.
- [11] Arnieri, E., Boccia, L., Amendola, G., & Di Massa, G. (2007). A compact high gain antenna for small satellite applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 55(2), 277-282.
- [12] Juyal, P., & Shafai, L. (2016). Gain enhancement in circular microstrip antenna via linear superposition of higher zeros. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16, 896-899.
- [13] Guan, D. F., Ding, C., Qian, Z. P., Zhang, Y. S., Guo, Y. J., & Gong, K. (2016). Broadband high-gain SIW cavity-backed circular-polarized array antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 64(4), 1493-1497.

- [14] Feng, B., Tu, Y., Chen, J., Yin, S., & Chung, K. L. (2020). Dual linearly-polarized antenna array with high gain and high isolation for 5G millimeter-wave applications. *IEEE Access*, 8, 82471-82480.
- [15] Al-Alem, Y., & Kishk, A. A. (2018). Efficient millimeter-wave antenna based on the exploitation of microstrip line discontinuity radiation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 66(6), 2844-2852.
- [16] Sakakibara, K., & Kouemou, G. (2009). High-Gain Millimeter-Wave Planar Array Antennas with Traveling-Wave Excitation. *Radar Technology*, 319-340.
- [17] You, Y., Lu, Y., You, Q., Wang, Y., Huang, J., & Lancaster, M. J. (2018). Millimeter-wave high-gain frequency-scanned antenna based on waveguide continuous transverse stubs. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 66(11), 6370-6375.
- [18] Ashraf, N., Haraz, O., Ashraf, M. A., & Alshebeili, S. (2015, May). 28/38-GHz dual-band millimeter wave SIW array antenna with EBG structures for 5G applications. In *2015 international conference on information and communication technology research (ICTRC)* (pp. 5-8). IEEE.
- [19] Zhang, X. F., Fan, J., & Chen, J. X. (2018). High gain and high-efficiency millimeter-wave antenna based on spoof surface plasmon polaritons. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 67(1), 687-691.
- [20] Zhang, J., Ge, X., Li, Q., Guizani, M., & Zhang, Y. (2016). 5G millimeter-wave antenna array: Design and challenges. *IEEE Wireless communications*, 24(2), 106-112.
- [21] Sohail, A., Khan, H., Khan, U., Khattak, M. I., Saleem, N., & Nasir, J. A. (2019, January). Design and analysis of a novel patch antenna array for 5G and millimeter wave applications. In *2019 2nd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET)* (pp. 1-6). IEEE.
- [22] Lee, I., Sawant, A., & Choi, E. (2020). High-directivity orbital angular momentum antenna for millimeter-wave wireless communications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 69(7), 4189-4194.
- [23] IIZUKA, H., Watanabe, T., Sato, K., & NISHIKAWA, K. (2003). Millimeter-wave microstrip array antenna for automotive radars. *IEICE transactions on communications*, 86(9), 2728-2738.
- [24] Ghiotto, A., Parment, F., Vuong, T. P., & Wu, K. (2016). Millimeter-wave air-filled SIW antipodal linearly tapered slot antenna. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16, 768-771.
- [25] Matin, M. A. (2016). Review on millimeter wave antennas-potential candidate for 5G enabled applications. *Advanced Electromagnetics*, 5(3), 98-105.
- [26] Wang, X. C., Xia, Y. J., Yang, J. H., & Lu, W. Z. (2022). Wideband High-Gain Circularly Polarized Substrate Integrated Cavity Antenna Array for Millimeter-

- Wave Applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 71(1), 1041-1046.
- [27] Menzel, W., Pilz, D., & Al-Tikriti, M. (2002). Millimeter-wave folded reflector antennas with high gain, low loss, and low profile. *IEEE Antennas and Propagation magazine*, 44(3), 24-29.
- [28] Hsu, Y. W., Huang, T. C., Lin, H. S., & Lin, Y. C. (2017). Dual-polarized quasi Yagi–Uda antennas with endfire radiation for millimeter-wave MIMO terminals. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 65(12), 6282-6289.
- [29] Ding, X., Wang, B. Z., & He, G. Q. (2013). Research on a millimeter-wave phased array with wide-angle scanning performance. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 61(10), 5319-5324.
- [30] Kapusuz, K. Y., & Oguz, U. (2016, April). Millimeter wave phased array antenna for modern wireless communication systems. In *2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)* (pp. 1-4). IEEE.