

113 年度國防部補助軍事院校教師(官) 從事學術研究計畫

學生創新思維在智慧型穿戴裝置天線
設計中的應用

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 12 月 05 日

目錄

圖目錄	II
表目錄	III
第一章 序論	1
第二章 研究原理	3
(3-1) MIMO 特性研析訓練	23
(3-2) SAR 數值評估訓練	26
第四章 預期效益與對軍事教育改革潛力	32
第五章 結論與未來展望	33
第六章 計畫編組與計畫成果	35
參考文獻	40

圖目錄

圖 1 多集成天線整合穿戴式裝置幾何結構圖 (a)正視圖 (b)側視圖	6
圖 2 各埠天線激發產生電流相位分佈與路徑圖	7
圖 3 多集成天線整合穿戴式裝置實測 2D 輻射場型圖	8
圖 4 Ant 1 寄生式單極天線末端長度 S 之參數探討圖	10
圖 5 集總式電容 C_a 值之探討圖	11
圖 6 穿戴式裝置 Ant 3 結構分析圖	12
圖 7 穿戴式裝置 Ant 3 開槽孔長度 L 之探討圖	13
圖 8 穿戴式裝置 Ant 3 帶通濾波器之探討圖	15
圖 9 穿戴式裝置 Ant 4 結構分析圖(I)	16
圖 10 穿戴式裝置 Ant 4 結構分析圖	18
圖 11 Ant 4 電流路徑與相位分佈圖	19
圖 12 Ant 4 集總式電容 C_c 值之探討圖	20
圖 13 Ant 4 集總式電感 L_b 值之探討圖	21
圖 14 Ant 4d 帶通濾波器之探討圖	22
圖 15 Ant 4 (proposed)帶通濾波器之探討圖	23
圖 16 Ant 1- Ant 2 於 3.6 GHz 輻射場型於直角座標系統圖	24
圖 17 模擬與實測 Ant 1- Ant 2 於 5G FR1 n77/78/79 band 封包相關係數圖	25
圖 18 模擬與實測 Ant 1-Ant 2 傳輸係數於 5G FR1 n77/78/79 band	25
圖 19 穿戴式裝置 Ant 1 激發於 3600 MHz 的 SAR 值分佈圖	28
圖 20 穿戴式裝置 Ant 2 激發於 3600 MHz 的 SAR 值分佈圖	28
圖 21 穿戴式裝置 Ant 3 激發於 2450 MHz 的 SAR 值分佈圖	29
圖 22 穿戴式裝置 Ant 3 激發於 5500 MHz 的 SAR 值分佈圖	29
圖 23 穿戴式裝置 Ant 4 激發於 820 MHz 的 SAR 值分佈圖	30
圖 24 穿戴式裝置 Ant 4 激發於 930 MHz 的 SAR 值分佈圖	31
圖 25 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	35
表 2 計畫之執行進度甘特圖	37

第一章 序論

依據 110 年國防報告書中指出，新式武器裝備的籌獲與組織編裝的調整，固然為建軍要務，仍須藉由落實部隊訓練，才能達到有效提升戰力的目標，有自主的國防，才有自主的國家，「國防自主」是政府一貫的政策，經過縝密規劃、努力執行，軍事科技與武器平臺快速發展，國軍除秉持前瞻思維，威懾力度與針對性作為將更趨緊迫，嚴重威脅著臺海安全局勢，有鑑於軍事科技與武器平臺快速發展，國軍除秉持前瞻思維，更審酌嚴峻的敵情威脅，積極建軍備戰，並以迅速提升戰力為首要，持續強化聯合作戰效能，制定與實踐國防戰略目標，積極建構可恃國防力量，結合國防科技與民間能量，加速推動國防事務革新，成為國家社會繁榮發展的堅實保障。

在當今的軍事科技領域，天線設計扮演著至關重要的角色。天線不僅是無線通信系統的核心部分，也是現代戰爭中不可或缺的元素。在台灣這樣的地理和政治環境下，高效能的通信系統對於國防安全尤為重要。天線設計對於國防科技重要性的幾個關鍵點，首先通信與情報收集，在軍事行動中，有效的通信對於指揮控制、情報收集和作戰執行至關重要。天線設計影響著通信系統的範圍、可靠性和秘密性。特別是在電子戰和反電子戰的環境中，先進的天線技術可以提供更強的信號干擾能力和更高的抗干擾性，另外一面，雷達系統是現代軍事不可或缺的部分，用於偵測、追蹤和識別敵方目標，天線設計直接影響雷達系統的性能，包括其探測範圍、解析度和精確度。隨著隱形技術的發展，開發能夠探測低可視性目標的高靈敏度天線變得尤為重要，且隨著無人機和其他無人系統在軍事作戰中的日益普及，對於小型化、高效能的天線需求日益增加。這些天線需要在有限的空間內提供最大的功能性，包括長距離通信和精確的定位能力，另外在電子戰中，天線設計對於干擾敵方通信、雷達和其他電子系統至關重要。透過先進的天線技術，可以有效地擾亂敵方的電子設備，從而獲得戰場上的優

勢，隨著科技的不斷進步，天線設計也在不斷創新。這要求國防研發部門持續投入資源，開發新型天線技術，以應對日益複雜的軍事威脅和挑戰。

總結來說，關於天線設計在國防科技中的重要性與智慧型手錶創新天線設計的相關性是有高度相關性的，可以從以下幾個方面來探討，在軍事應用中，尤其是個人裝備和通信系統方面，對於小型化且高效能的天線需求日益增長。智慧型手錶作為個人穿戴裝置，其天線設計的創新直接影響到裝置的性能和應用範圍。在軍事領域，這種小型化的高效能天線可以用於提升士兵的通信能力，同時保持裝備的輕便性，智慧型手錶的天線設計通常需要支持多種通信標準和頻段，這種多功能性和靈活性在軍事通信中也極為重要。軍事通信設備需要在不同的操作環境和任務需求下保持高效的通信能力，這要求天線能夠適應多種頻段和通信模式，在軍事應用中，隱蔽性和低可偵測性是關鍵因素。智慧型手錶的創新天線設計可以探索如何在保持高效能的同時減少電磁波的散發，從而降低被敵方偵測的風險。這對於提升軍事行動的隱蔽性和安全性有直接的貢獻，智慧型手錶中的創新天線技術，可以促進軍事通信技術的發展。民用技術的創新往往會推動軍事技術的進步，反之亦然。在這種技術交叉融合的過程中，可以發現新的設計理念和解決方案，進一步推動軍事通信技術的創新。因此智慧型手錶中的創新天線設計與軍事通信技術的發展息息相關。從迷你化、多功能性到隱蔽性的提升，這些技術的創新不僅對民用市場有重要意義，同時也為軍事通信設備的發展提供了寶貴的技術參考和創新靈感。**所以希望透過本案執行智慧型手錶中的創新天線設計，投入在軍事院校教育中，使軍事教育中的學子可以參與前沿的技術研究和開發項目。在這些項目中，學生可以將理論知識與實際應用相結合，以智慧型手錶天線設計的創新實踐為主題，「不僅有助於提升軍校生的技術能力，也有助於推動軍事通信技術的發展」。**

第二章 研究原理

本案計畫研究重點為多天線集合整合於智慧型穿戴裝置創新天線設計，本計畫預計提出了應用於第五代通訊多集成天線整合穿戴式裝置，帶領學生設計天線可內置於穿戴式裝置內，且可應用方面於第五代通訊與物聯網。天線設計頻段涵蓋 WLAN 2.4/5G band (2400 ~ 2484 MHz, 5150 ~ 5850 MHz), GPS 衛星定位(1575 MHz), Narrow Band Internet of Things (NB-IoT) band 8 (880 ~ 960 MHz)與 GSM 850/900 行動通訊頻段(824 ~ 960 MHz)，也涵蓋 5G FR1 n77/78/79 band (3300 ~ 5000 MHz) 並配置為 2×2 MIMO 狀態，並【挑戰設計於尺寸 $37 \times 43 \times 8 \text{ mm}^3$ 金屬機身的穿戴裝置內，達到集成式天線整合】。

因為需要已經限制學生穿戴式裝置的大小，所以當面臨學生穿戴式裝置尺寸的限制時，天線設計的挑戰顯著增加。這種限制不僅對天線的物理尺寸提出要求，也對其性能和功能性提出了更高的標準，所以本案計畫透過教育學生<天線結構的優化設計>、<集成技術的多功能設計>，讓學生發揮創新思維，思考如何在一個小型天線中實現多頻段操作，且考量如何將天線與其他電子元件集成，以減少所需的空間並提高整體效率，研究如何通過改變天線的幾何結構來優化其性能，通過這些思考方向，學生不僅能夠深入理解天線設計的挑戰，也能夠激發他們的創新思維，為未來的軍事通信技術做出貢獻。在軍事院校

中，這樣的實踐和探索對於培養學生的技術能力和創新精神至關重要，本案將透過計畫主持人以往的設計天線成果，進行說明，並引導學生自主創新思維設計出不同的多頻段天線結構設計與應用，以下說明，首先圖 1 顯示應用於第五代通訊多集成天線整合穿戴式裝置幾何結構圖，在這項設計中，系統電路板由介電常數為 4.4 且損耗角正切為 0.024 的 FR4 基板製成，該電路板的邊緣圍繞著 0.8 mm 厚的金屬框架。此處研究的智慧手錶尺寸為 $37 \times 43 \times 8 \text{ mm}^3$ ，相當於當前市場上尺寸為 44 mm 智慧型手錶款式。

應用於第五代通訊多集成天線整合穿戴式裝置由 Ant 1 - Ant 2 (5G FR1 n77/78/79 band 2×2 MIMO), Ant 3 (WLAN 2.4/5G band), Ant 4 (GSM 850/900, NB-IoT band 8 and GPS 1575) 4 組天線所組成的系統用以滿足及符合未來市場需求。所設計的 4 組天線放置於智慧型手錶的長側邊，短側邊則為淨空區設計，主要考量穿戴式裝置可提供可更換錶帶(皮革製、尼龍製、不銹鋼及陶瓷錶帶)設計，所以整體短側邊實施淨空設計可避免錶帶的材質(對應不同介電系數)所影響傳輸性能。圖中的紅點為天線饋入點，使用 50 歐姆同軸纜線的內部導體連接。Ant 1 的天線結構由槽孔天線及耦合線組成，以下針對各別天線說明，首先 Ant 1 利用穿戴式裝置內立體轉折處產生 L 型槽孔，並使用耦合線激發 L 型的開槽孔天線，其共振路徑為 A 點至 B 點，如圖 2(a)所示共振長度為 15 mm，約為 3600 MHz 的 $0.14\lambda_s$ ，同時耦合線段也形成

寄生式單極天線(E 點到 F 點)，如圖 2(b)共振於 5550 MHz 產生雙共振模態於小空間內有效涵蓋 5G FR1 n77/78/79 band。Ant 2 的結構與 Ant 1 相同，使用 L 型開槽孔天線，其共振路徑為 C 點到 D 點，如圖 2(c)其共振長度為 16 mm，約為 3600 MHz 的 $0.15\lambda_s$ ，也利用寄生式單極天線(G 點至 H 點)與金屬邊框共生，如圖 2(d)共振於 5950 MHz 產生雙共振模態於小空間內有效涵蓋 5G FR1 n77/78/79 band。

另一方面，Ant 1 (E 點到 F 點)與 Ant 2 (G 點到 H 點)的寄生式單極天線也扮演著調整阻抗匹配及頻寬比的特性，相關細節已在章節 2.3.2 做詳細的探討。其中 Ant 1 的電容 C_a (1 pF)用於微調在 5G FR1 n77/78/79 band 中生成雙共振模態的阻抗匹配，另一方面，Ant 1 (E 點到 F 點)與 Ant 2 (G 點到 H 點)的寄生式單極天線也扮演著調整阻抗匹配及頻寬比的特性，其中 Ant 1 的電容 C_a (1 pF)用於微調在 5G FR1 n77/78/79 band 中生成雙共振模態的阻抗匹配。

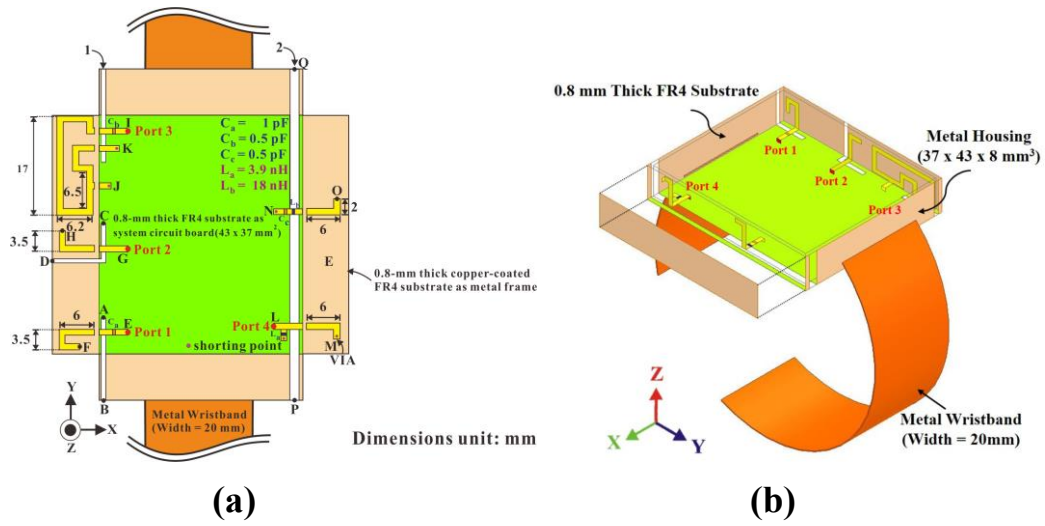


圖 1 多集成天線整合穿戴式裝置幾何結構圖 (a)正視圖 (b)側視圖

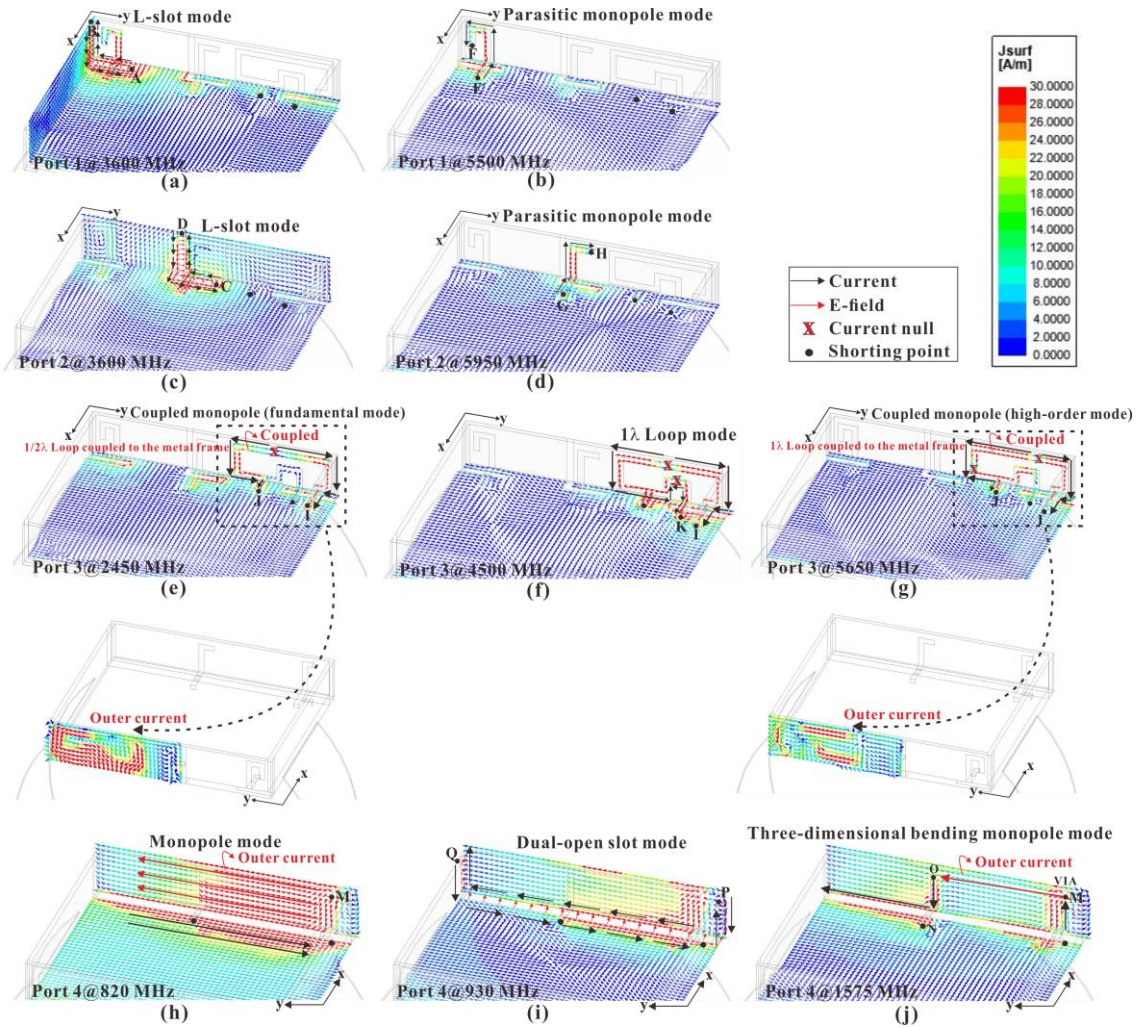


圖 2 各埠天線激發產生電流相位分佈與路徑圖

配置當中考量，Ant 3 由較長的彎曲金屬線環路(I 點至 J 點)耦合到另一面的金屬邊框，如圖 2(e)彎曲的金屬線環路總長度為 47 mm 並耦合到另一面的金屬邊框，使共振出耦合形單極(基本模態)於 2450 MHz。同樣的彎曲金屬線環路(I 點至 J 點)在 5650 MHz 共振出耦合形單極(高階模態)如圖 2(g)，但由於無法完整的覆蓋 WLAN 5G 頻段(5150 ~ 5850 MHz)，所以額外設計 bending loop (I 點到 K 點)為一波長 Loop 模態，如圖 2.2(f)使其共振於 4500 MHz 用於調節 WLAN 5G 阻抗匹配，完整覆蓋 WLAN 5G 所需之頻寬。此外，彎曲金屬線環路(I 點至 J 點)可形成散佈式電感，使用集總式電容 C_b (0.5 pF)搭配彎曲金屬線環路，最後可形成帶通濾波器，諧振頻率計算如式(1):

$$f = \frac{1}{(2\pi\sqrt{L_{dis}C_b})} \quad (\text{式 1})$$

內部結構中已經可以得知彎曲金屬線環路(I 點至 J 點)可視作為散佈式電感，以雙頻段帶通濾波器分析，與集總式電容 C_b (0.5 pF)串聯的情況下可分別在 2.5 GHz 時將散佈式電感 L_{dis} 視為=8.1 nH，5.3 GHz 時散佈式電感 L_{dis} 則視為 =1.7 nH，可濾除 WLAN 2.4/5G band 以外的共振模態避免造成干擾。所設計的耦合形單極天線以基本模態與高階模態來涵蓋 WLAN 雙頻效果，觀察場型圖 3 可看出因 Ant 3 所設計的 Loop

形式線段耦合至金屬邊框形成耦合形單極天線模態，使輻射場型有效的朝向外側金屬邊框(-X 方向)輻射，此設計可使共振路徑減少，進而達成天線小型化及結合金屬邊框與天線之設計。最後透過 L 型開槽孔長度可調整 WLAN 2.4 band 阻抗匹配，本計畫中將對學生進行【天線結構參數探討訓練】、【MIMO 特性研析訓練】、【SAR 數值評估訓練】，分別敘述如下：

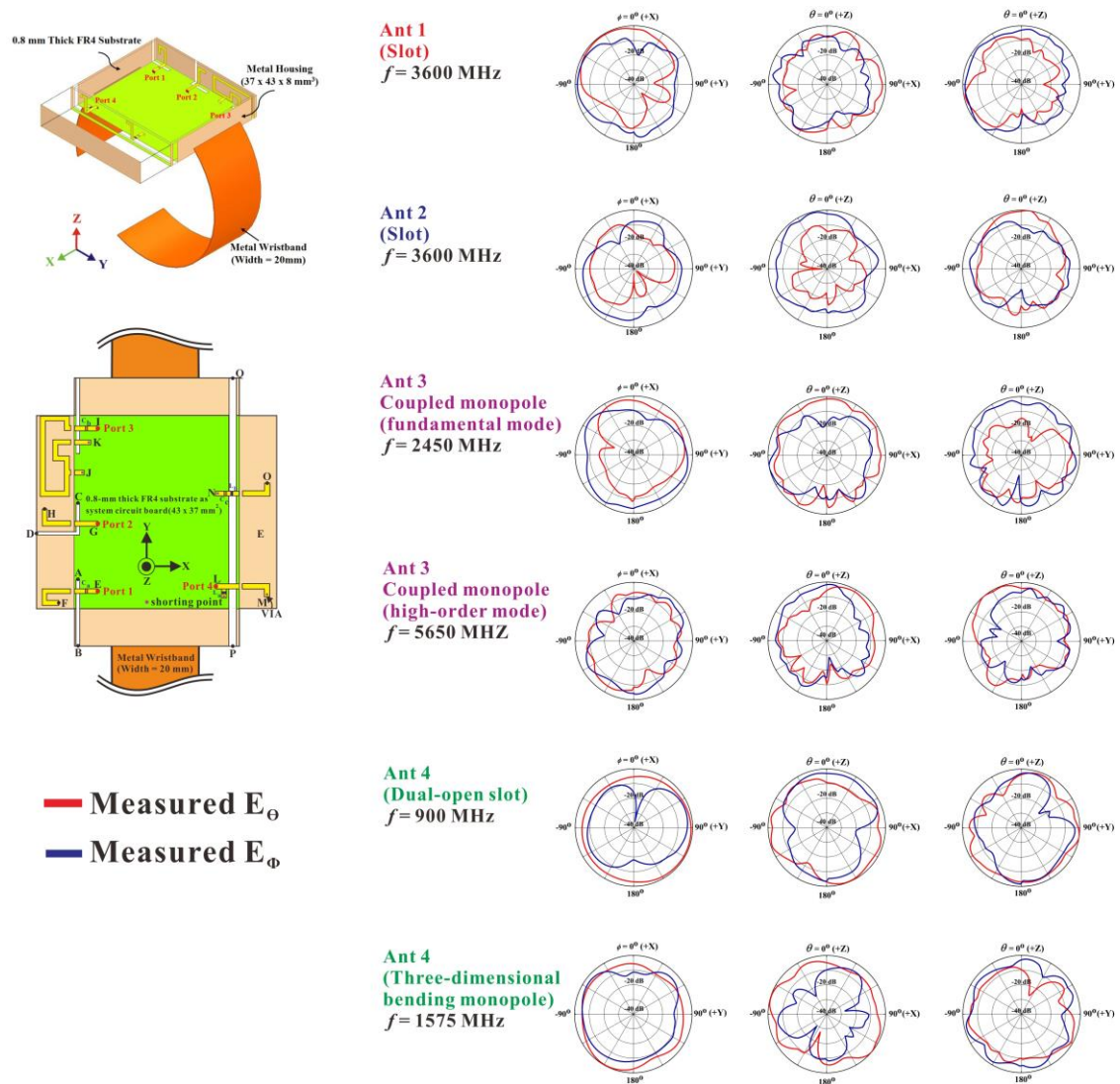


圖 3 多集成天線整合穿戴式裝置實測 2D 輻射場型圖

本案研究架構包含(1)天線結構參數探討訓練、(2)MIMO 多天線特性研析訓練、(3)SAR 數值評估訓練，首先為了訓練學生對天線結構可進行參數探討，以上述智慧型穿戴裝置天線設計為例，進一步驗證 Ant 1 寄生式單極天線對於調整阻抗匹配及頻寬比的特性，將寄生式單極天線的末端長度 S 做參數分析，從圖 4 觀察到當寄生式單極天線末端長度 S 從 1.5 mm 增加到 5.5 mm 時，阻抗匹配及頻寬比有著不同的變化。當寄生式單極天線末端長度 S 為 5.5 mm 時，因末端路徑增加，導致低頻 L-slot 的模態具有較大電容性而導致匹配效果較差，但是在高頻寄生式單極天線的模態，因長度增加導致共振頻率偏移降低至 5100 MHz，使得寄生式單極天線模態與 L-slot 模態逐漸聚合，從而導致較好的阻抗匹配。則寄生式單極天線末端長度 S 為 1.5 mm 時則與上述情況相反，最後參數選擇 S 為 3.5 mm 則有最佳的阻抗匹配及頻寬比。在 Ant 2 天線設計原理則與 Ant 1 相同，所以本章節則探討 Ant 1 的寄生式單極天線的末端長度 S 做參數分析並探討阻抗匹配調整及頻寬比的特性。

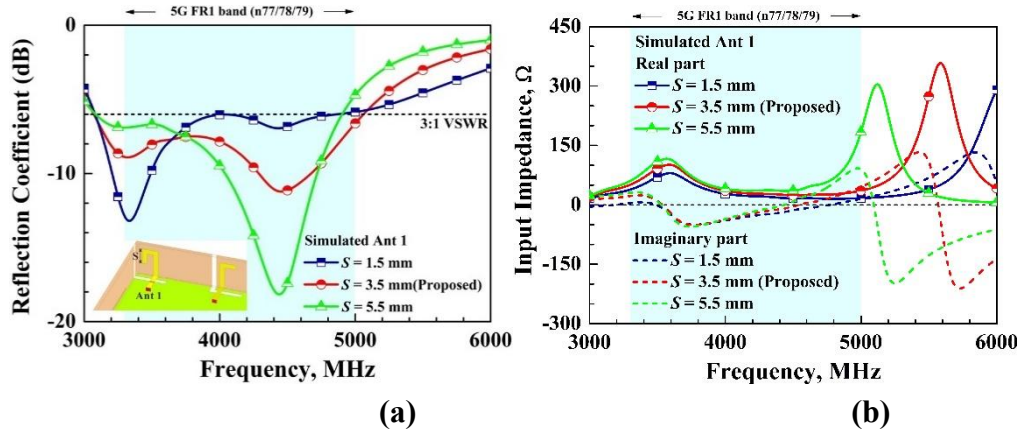
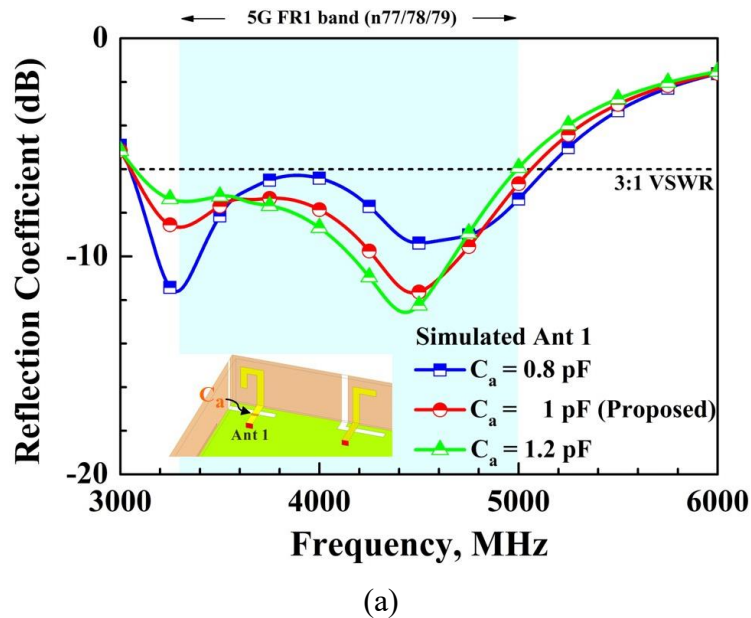
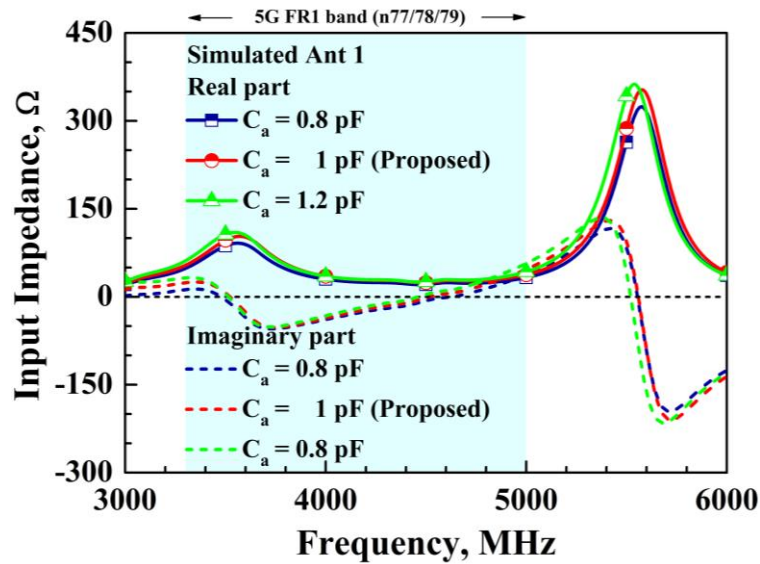


圖 4 Ant 1 寄生式單極天線末端長度 S 之參數探討圖

(a)反射係數 (b)輸入阻抗

下一步則是分析電容 C_a 對於 Ant 1 的影響，由於上述對於寄生式單極天線的末端長度做參數分析，從電容 C_a 的探討圖 5 也可觀察出電容 C_a 的值也可有效的調節 Ant 1 在 5G FR1 n77/78/79 band 雙共振模態的阻抗匹配。使 Ant 1 於該頻段內擁有穩定及良好的反射係數與輻射效率，該設計可使 Ant 1 激發於 5G 頻段擁有很大的可調整性。



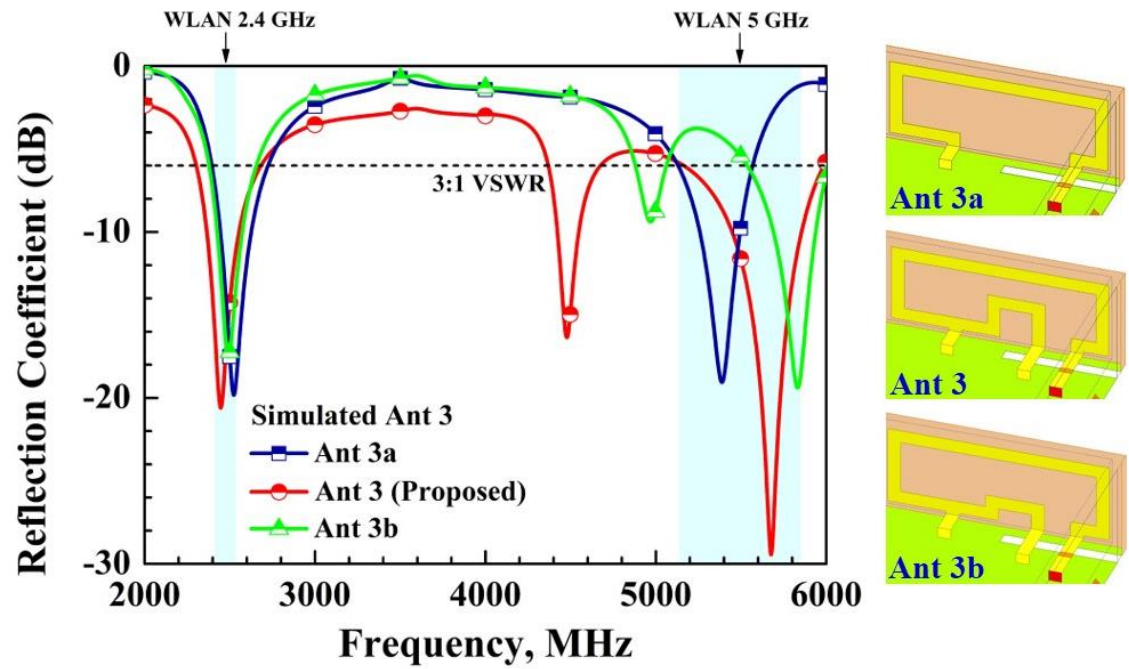


(b)

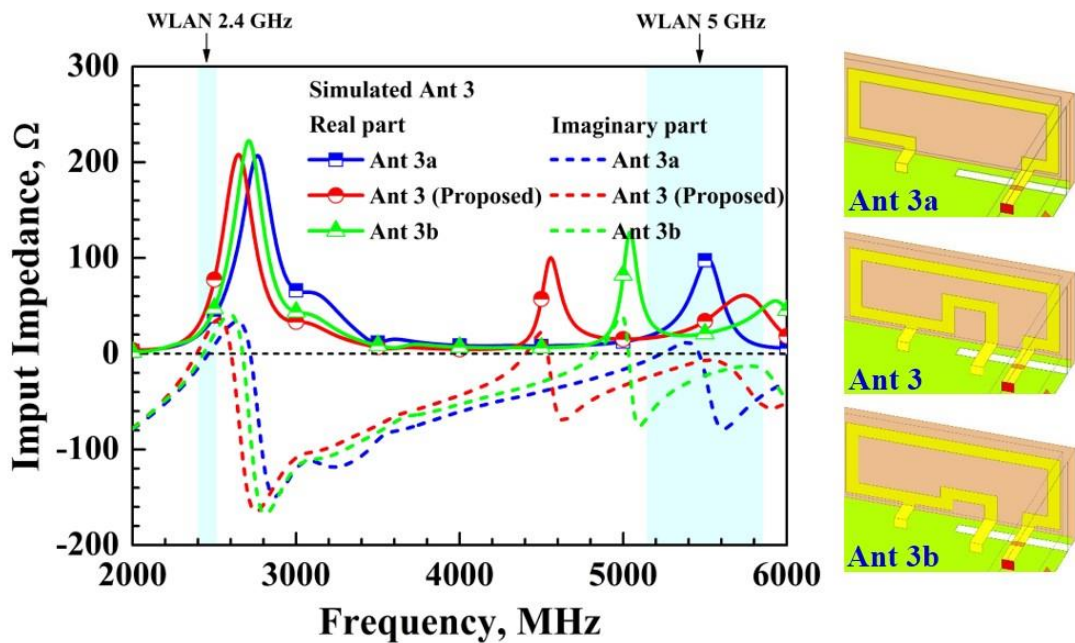
圖 5 集總式電容 C_a 值之探討圖

(a) 反射係數 (b) 輸入阻抗

在 Ant 3 設計上有許多結構，以下以 4 個參數分析去做說明。首先對 bending loop (I 點到 K 點) 進行分析，結構拆解為 Ant 3a (without bending loop), Ant 3 (proposed antenna) 和 Ant 3b (with a shorter bending loop) 的狀態。圖 6(a) 可觀察到 Ant 3a 在無 bending loop 的情況下只在 5400 MHz 產生耦合形單極(高階模態)，但不足以覆蓋 WLAN 5G band (5150 ~ 5850 MHz)。在 Ant 3b 加入一條相較短 bending loop 共振於 5000 MHz，但導致耦合式單極(高階模態)諧振頻率有增加的趨勢。最後在 Ant 3 (proposed antenna) 將 bending loop 的共振長度增加，進一步將諧振頻率降低至 4550 MHz，並藉由此模態對耦合形單極(高階模態)調節阻抗匹配，從圖 6(b) 觀察得知頻段已涵蓋 WLAN 5G band (5150 ~ 5850 MHz)。



(a)



(b)

圖 6 穿戴式裝置 Ant 3 結構分析圖

(a)反射係數 (b)輸入阻抗

以上探討可看出在 bending loop 的結構部分功能是調節 WLAN 5G band，同時也針對 Ant 3 的開槽孔長度進行優化。由圖 7(b)中可看出開槽孔諧振頻率約為 3100 MHz，藉由增加開槽孔長度 L 時，耦合形

單極(基本模態)的諧振頻率出現頻率降低的趨勢，這是由於開槽孔模態(3100 MHz)與耦合型單極基本模態(2450 MHz)頻率相近，所以在改變槽孔長度同時，也會影響到耦合形單極(基本模態)。以上兩個參數分析證明槽孔長度 L 可獨立控制 WLAN 2.4 band 的模態並且對圖 7(a) 的 WLAN 5G band 無太大影響。另一方面 bending loop 的設計也可對 WLAN 5G band 中的模態匹配程度調整，且同樣具有獨立特性，並不影響 WLAN 2.4G band 的諧振模態，以上結果證明此雙頻 WLAN 2.4/5G band 天線的設計在應用上具有靈活調整的特性。

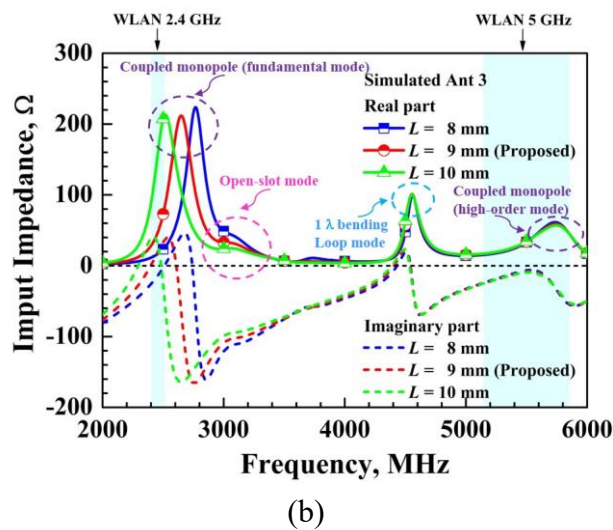
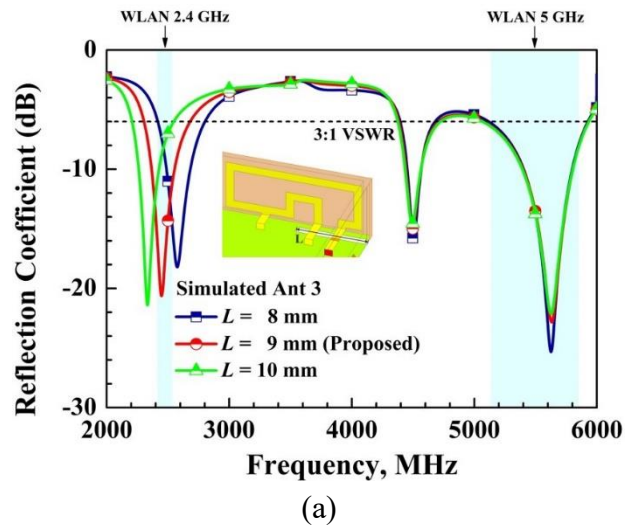
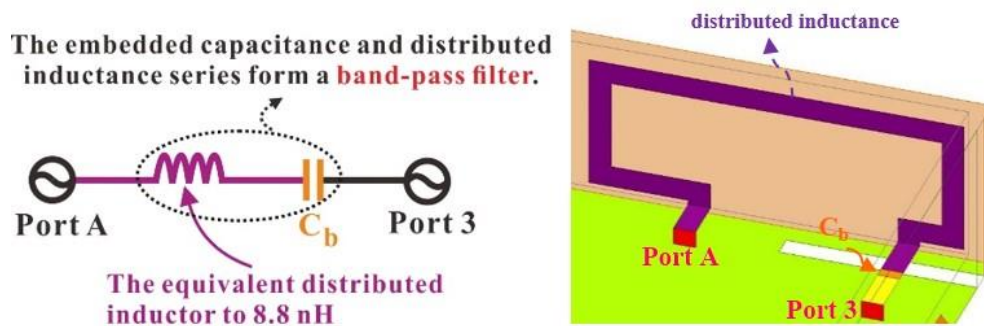


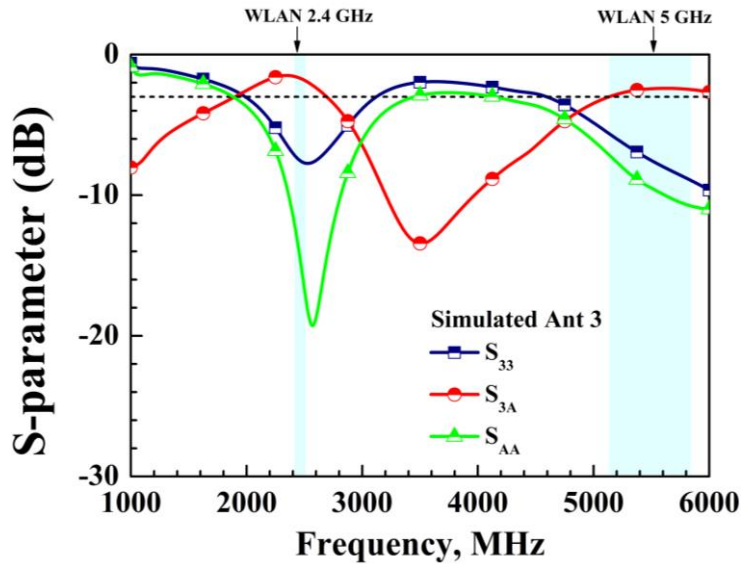
圖 7 穿戴式裝置 Ant 3 開槽孔長度 L 之探討圖

(a) 反射係數 (b) 輸入阻抗

最後分析帶通濾波器的設計，由於 Ant 3 使用 I 點至 J 點的金屬彎曲線耦合至金屬邊框，而共振出耦合形單極天線的基本模態及高階模態，而較長的路徑形成散佈式電感並串聯集總式 C_b 形成帶通濾波器。如圖 7(b) 可從 S3A 觀察濾除的頻段為 2.3 GHz 以下與 2.5 GHz ~ 5.1 GHz，而帶通濾波器通過的頻段為 WLAN 2.4G 及 WLAN 5G band，此設計可有效避免其他鄰近模態共振所產生干擾及避免使用 SMD 元件所帶來的能量消耗或是元件生產限制。由於 bending loop 的部分是用來調節 WLAN 5G band 阻抗匹配，為了擇要介紹，在此探討並未加入 bending loop 的部分。



(a)



(b)

圖 8 穿戴式裝置 Ant 3 帶通濾波器之探討圖

(a) 等效電路 (b) 頻率響應

在 Ant 4 首先進行直接饋入金屬邊框的單極模態及 dual-open slot 的雙共振模態的分析圖 8，在 Ant 4a 由支線耦合 dual-open slot 時，在 930 MHz (dual-open slot mode) 與 1900 MHz (coupled metal frame mode) 產生共振模態，在 Ant 4b 直接饋入(VIA)至金屬邊框時，也在 820 MHz 產生一個可利用的模態(monopole mode)，而 Ant 4c 則利用末端電感 L_a 下地來形成高通濾波匹配電路，有效調節分別在 820 MHz (dual-open slot mode) 和 930 MHz (metal frame mode) 雙共振模態的阻抗匹配。

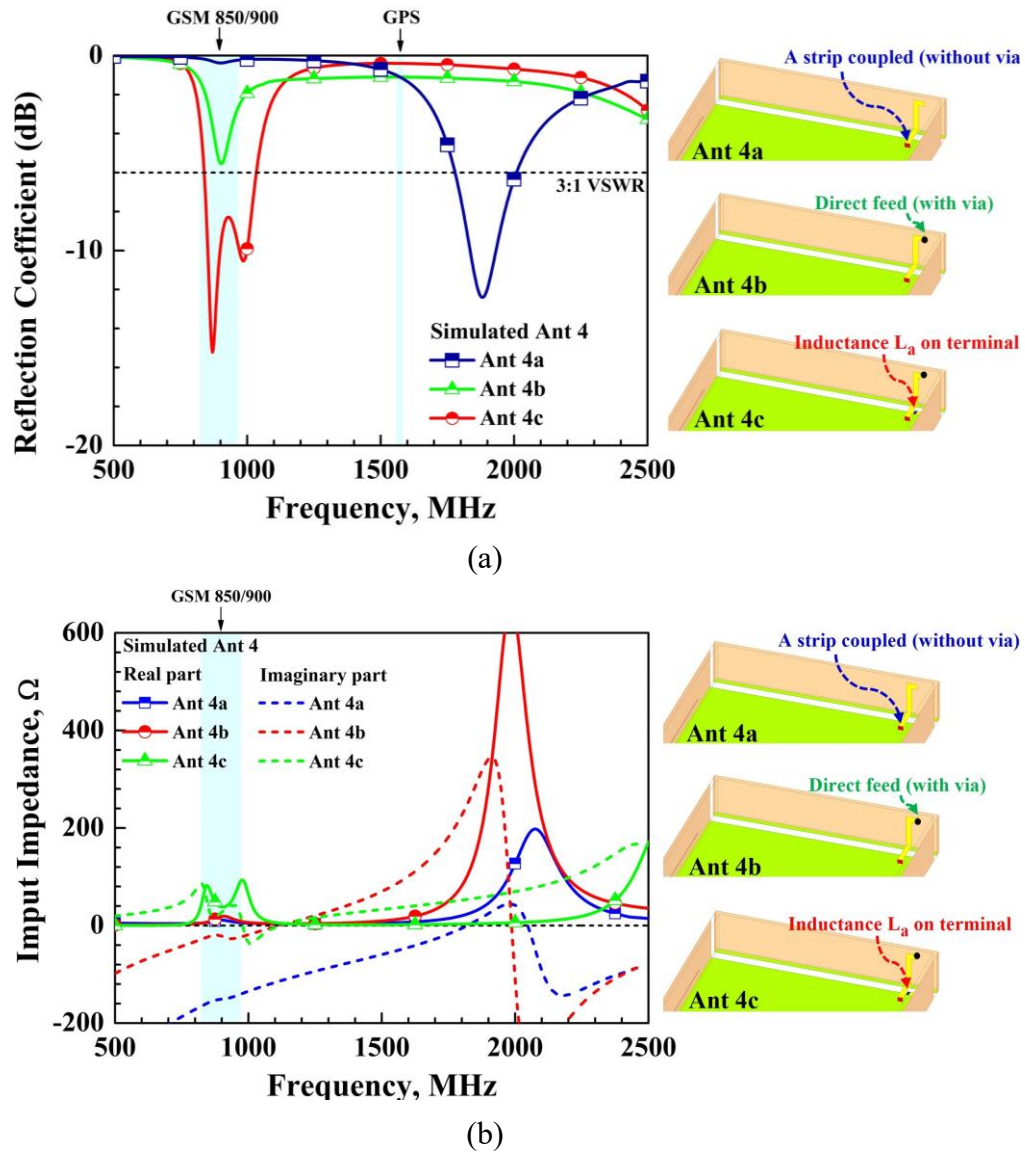


圖 9 穿戴式裝置 Ant 4 結構分析圖(I)

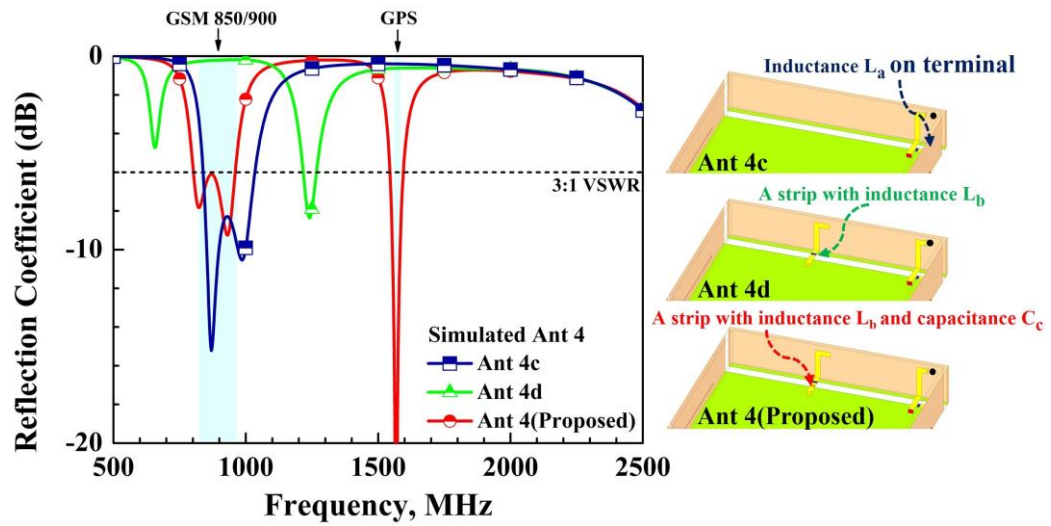
(a)反射係數 (b)輸入阻抗

最後已經進一步分析雙頻段帶通濾波器天線設計，以下拆解為三種結構 Ant 4c (inductance L_a on terminal only), Ant 4d (a strip with inductance L_b) and Ant4 (proposed antenna)來進行探討。圖 9 已經顯示出 Ant 4c 雙共振模態(dual resonate mode)，在分析時同時觀察表面電流

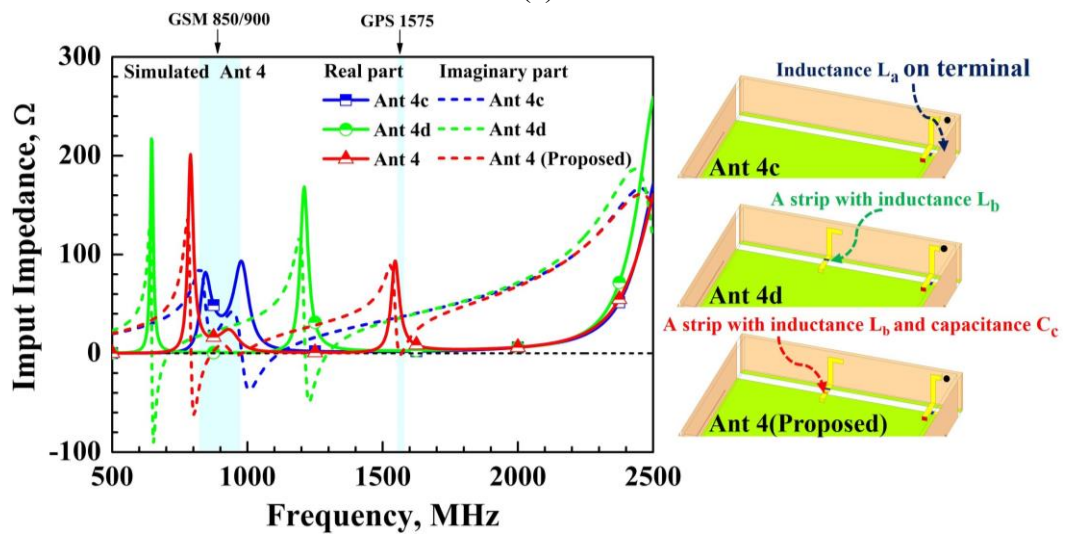
分布從圖 11(a)解析出外側金屬邊框上屬於單極模態，也可從圖 11(b)得知 dual-open slot 模態同樣共振於 GSM 頻段。

接下來在 Ant 4d (a strip with inductance L_b)加入電感 L_b (18 nH)下地，導引圖 11(c)金屬邊框上的部份電流至接地面上，使金屬邊框上的電流形成 Loop 形式的共振模態。另一方面，觀察同一區域上的 dual-open slot 邊緣如圖 11(d)，dual-open slot 模態在 820 MHz 共振，而在金屬邊框上耦合線段導致外側金屬邊框上的表面電流由 M 點到 O 點，接著由 O 點至電感 L_b (18 nH)下地，電流由 N 點開始沿著 dual-open slot 邊緣流動，形成圖 11(e)金屬邊框與槽孔共存的立體式彎曲單極模態共振於 1250 MHz。

最後 Ant 4 (proposed)加入電容 C_c ，設計頻段阻抗獲得調節，而原先 Ant 4b 的 Loop mode 諧振路徑圖 11(e)而因此改變，此時共振模態的電流路徑為圖 11(f)所對應金屬邊框形成的單極模態。最後電容 C_c 的加入與電感 L_b 串聯下地形成帶通濾波器型式，調整了立體式 bending 單極模態的阻抗匹配，透過觀察圖 10(h)確認其電流貢獻於 GPS 頻段 (1575 MHz)。



(a)



(b)

圖 10 穿戴式裝置 Ant 4 結構分析圖

(a)反射係數 (b)輸入阻抗

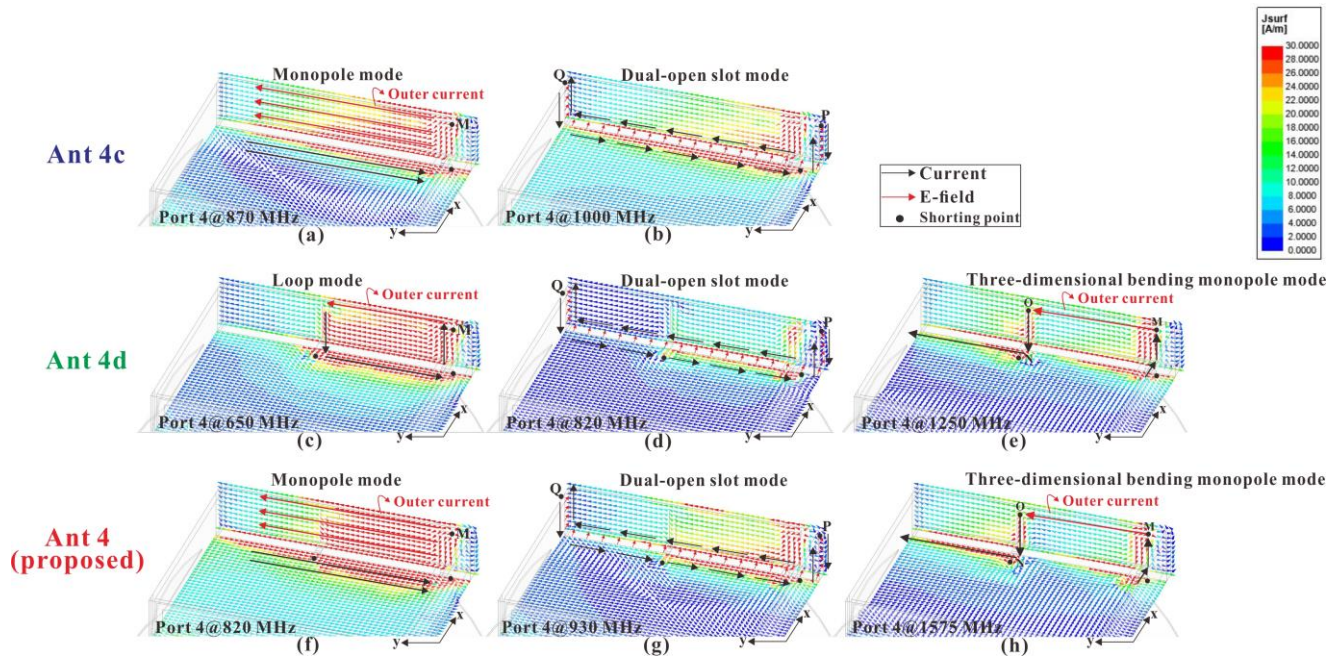
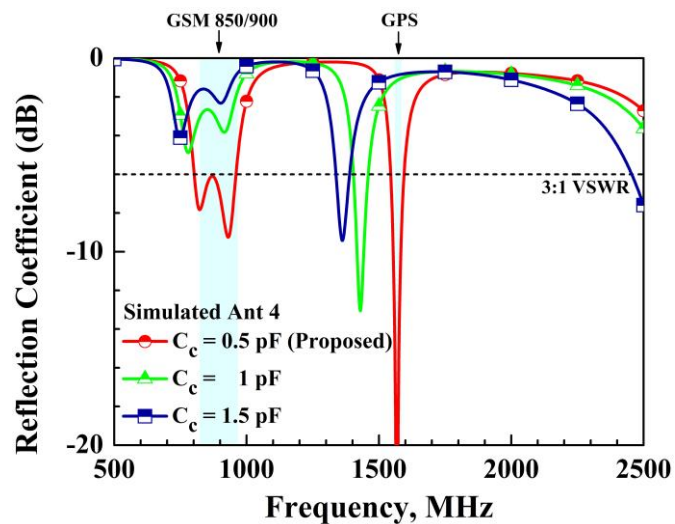


圖 11 Ant 4 電流路徑與相位分佈圖

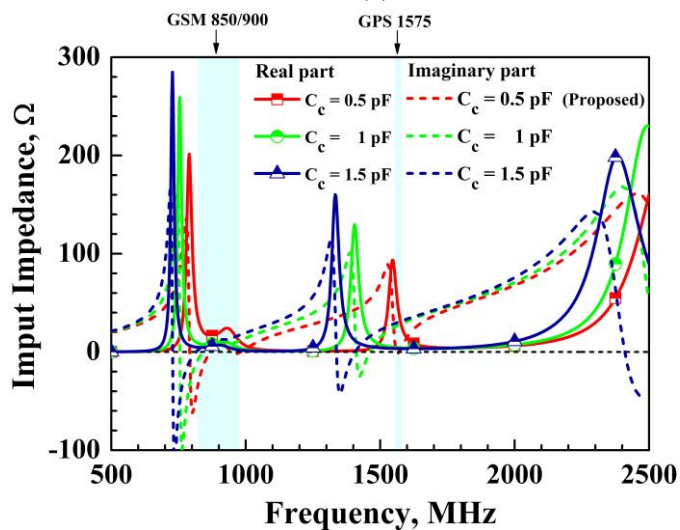
(a)單極模態(870 MHz)(b) dual-open slot 模態 (c) Loop 模態
 態(d) dual-open slot 模態(e)立體式彎曲單極模態(f)單極模態
 (820 MHz) (g) dual-open slot(930 MHz) (h)立體式彎曲單
 極模態(1575 MHz)

在圖 12 中可看出電容 C_c 元件值增加時 GSM 和 GPS 模態共振頻率都有往低頻偏移的趨勢，且對 GSM 雙共振模態匹配有著很大的影響，主要是電容阻抗在低頻的通過量增加所導致(諧振電流到地的路徑)。而圖 13 可看出電感 L_b 元件值增加時 GPS 模態往低頻偏移而 GSM 雙共振模態逐漸聚合，注意的是 C_c 和 L_b 元件值所產生的變化是由於金屬邊框的單極模態電流、dual-open slot 磁流和立體式彎曲單極模態電流的三個共振路徑的模態都會經過 O 點到 N 點進而導致三個模態諧振頻

率都有所改變。



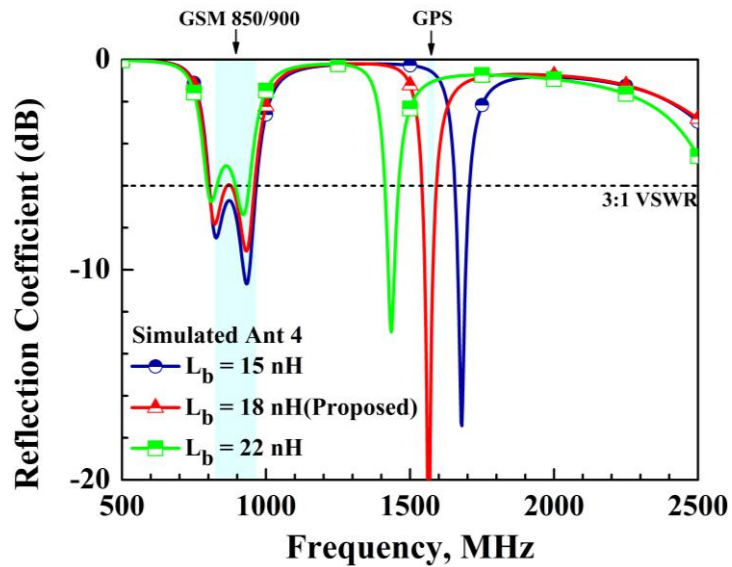
(a)



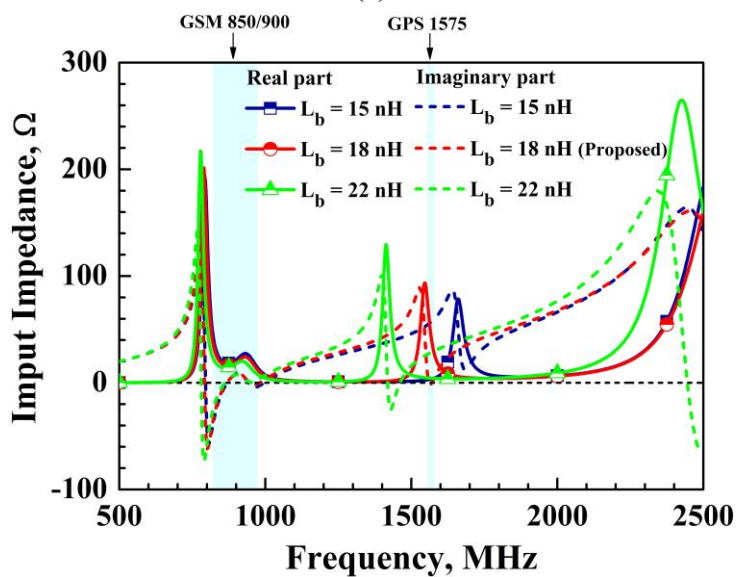
(b)

圖 12 Ant 4 集總式電容 C_c 值之探討圖

(a)反射係數 (b)輸入阻抗



(a)



(b)

圖 13 Ant 4 集總式電感 L_b 值之探討圖

(a)反射係數 (b)輸入阻抗

最後進行 Ant 4 帶通濾波器的探討與分析，透過頻率響應圖

2.19(b)分析 S45 則呈現雙頻帶的帶通濾波器效果(中心頻率分別為 0.68 和 1.22 GHz)，由於 GSM 850/900 的頻段範圍內為濾除狀態，最後圖 2.20(a)加入集總式電容 C_c 並串聯集總式電感 L_b 下地形成帶通濾波

器。並從圖 2.20(b)分析 S_{45} 後呈現近似 3 頻帶皆有帶通的功能(中心頻率為 0.9 GHz 和 1.575 GHz)。以上探討與分析證明了此帶通濾波器設計可在 GSM 850/900 及 GPS 1575 頻段的共振模態達到良好阻抗匹配並同時達成良好的天線性能。

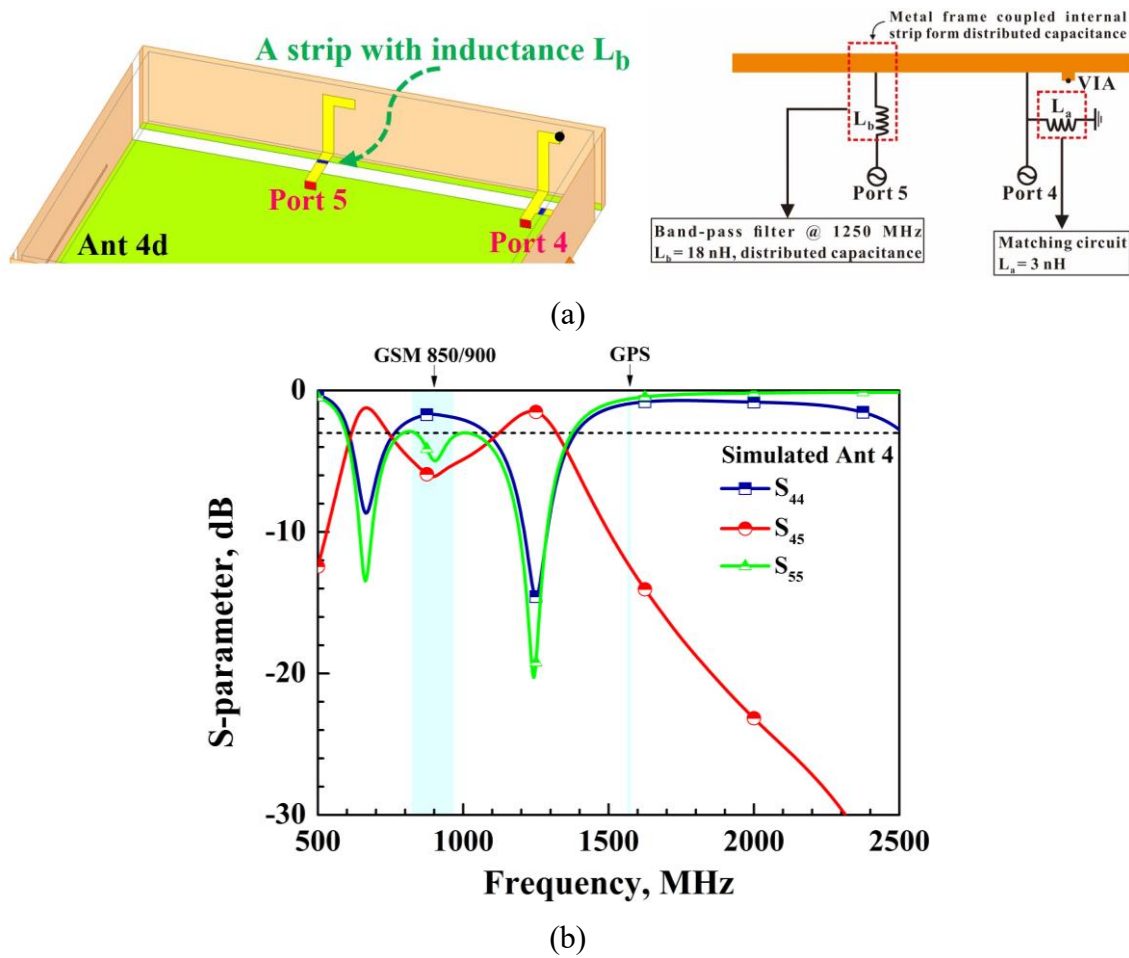


圖 14 Ant 4d 帶通濾波器之探討圖

(a) 等效電路 (b) 頻率響應

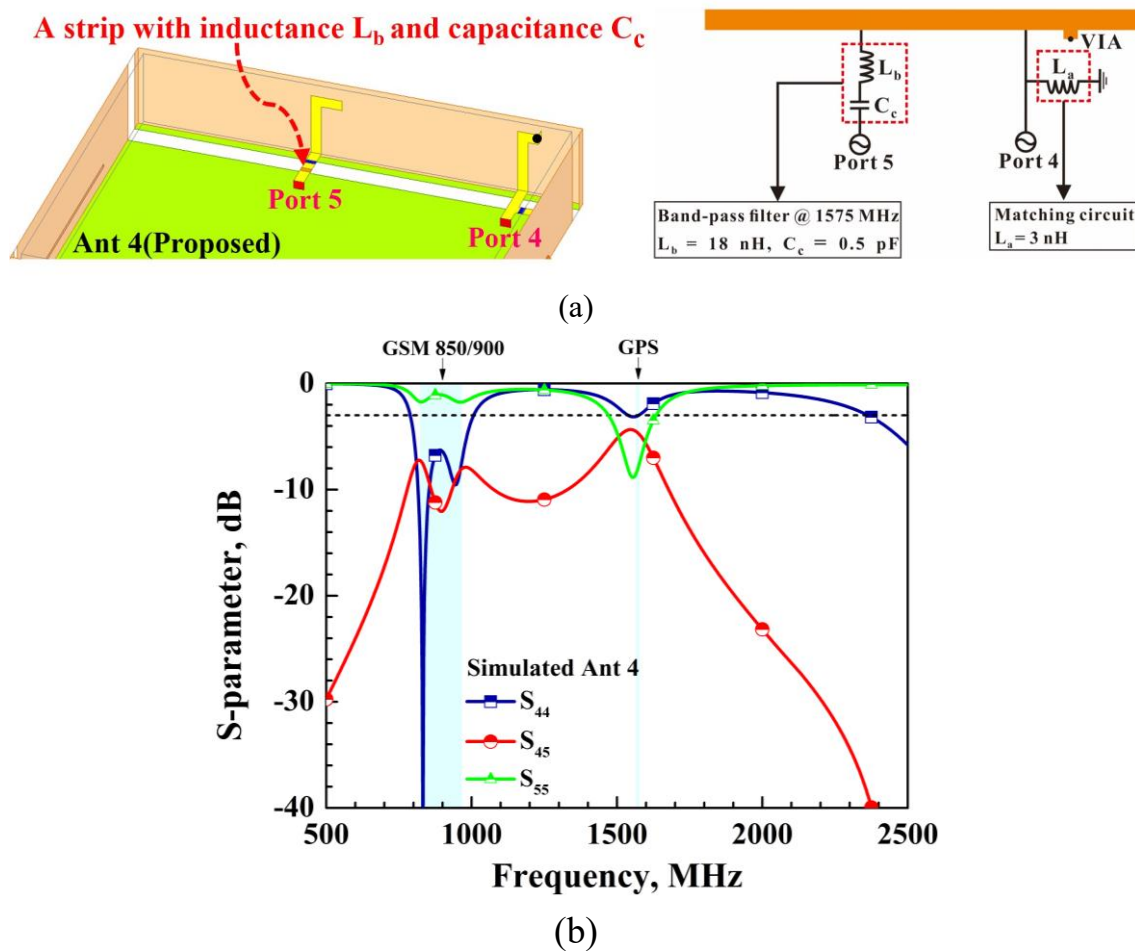


圖 15 Ant 4 (proposed)帶通濾波器之探討圖

(a)等效電路 (b)頻率響應

(3-1) MIMO 特性研析訓練

當中 MIMO 特性研析訓練，需要訓練學生判斷輻射場型分集的效率，其中 5G FR1 2×2 MIMO 天線為未來智慧手錶的應用趨勢，需要在空間較小的金屬邊框智慧手錶內加入 5G FR1 n77/78/79 band 2×2 MIMO 的天線設計，並同時達成良好的 MIMO 天線效能為一大挑戰。所提出的案例教學天線藉由邊框上槽孔天線設計達成場型分集的效果，

如圖 16 所示 Ant 1 在 XY-plane 上 $E_{\theta}(\Phi)$ 為 -80° ，Ant 2 $E_{\theta}(\Phi)$ 則為 106° ，這是由於 Ant 1 和 Ant 2 的開槽孔天線方向的設計所達成場型分集的效果。這也是在 Ant 1 和 Ant 2 距離 14.5 mm ($0.13 \lambda_s$) 的情況下，再不加入解耦元件的隔離度表現卻可小於 -10 dB。圖 17 顯示了透過場型分集的特性可使 ECC 實測與模擬均小於 0.1 和圖 18 顯示 5G FR1 2×2 MIMO 天線的隔離度，Ant 1 和 Ant 2 均使用 Bwant-MIMO OTA 量測系統實測多輸入及多輸出天線相關數據一覽表 1，可以證明所提出 5G FR1 band 2 $\times 2$ MIMO 天線設計應用於第五代通訊多集成天線整合穿戴式裝置可達成良好的性能。

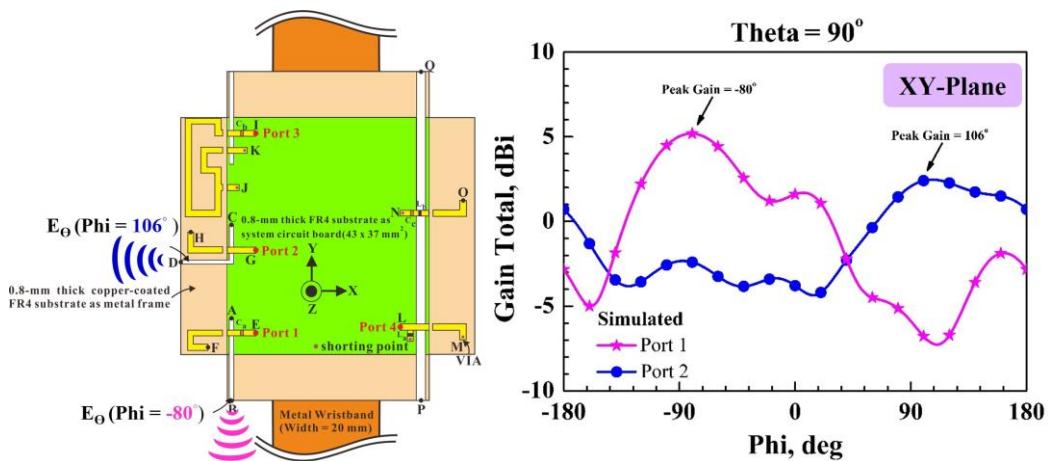


圖 16 Ant 1- Ant 2 於 3.6 GHz 輻射場型於直角座標系統圖

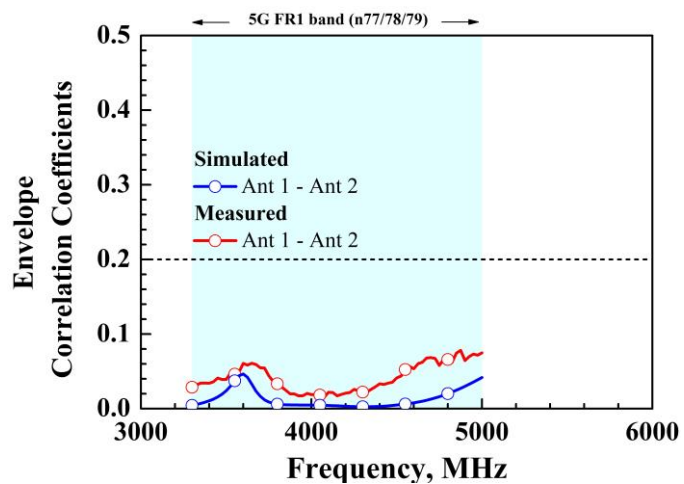


圖 17 模擬與實測 Ant 1- Ant 2 於 5G FR1 n77/78/79 band

封包相關係數圖

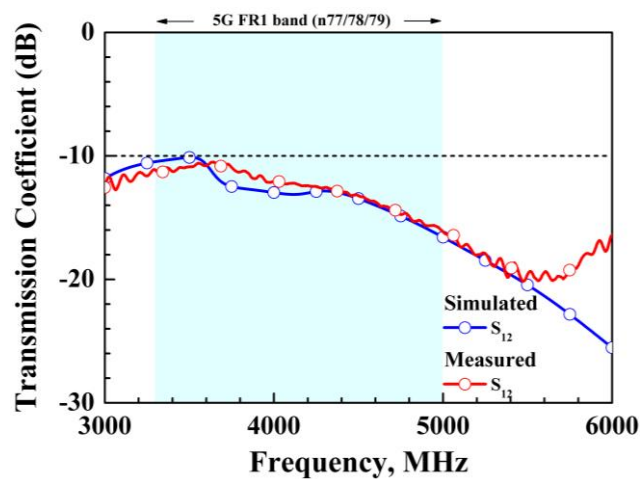


圖 18 模擬與實測 Ant 1-Ant 2 傳輸係數於 5G FR1
n77/78/79 band

表 1 Ant 1- Ant 2 實測多輸入及多輸出天線相關性能數據一覽表

Measured capacity for Ant 1 ~ Ant 2 in a 2×2 MIMO with Rayleigh fading, Modulation 256 - QAM, B.W = 100 MHz, Distance = 2.5 m, BER $\approx$ 0.01				
Spectrum	Power(dBm)	SNR of 2 ports(dB)	Bandwidth Efficiency	Throughput Avg.(Mbps)
5G FR1 n77/78/79 band	20	25.1 ~ 28.2	8.5 ~ 8.6	1009.1

(3-2) SAR 數值評估訓練

SAR (Specific Absorption Rate)為電介質單位質量中人體吸收電磁能的量度，計畫團隊為了讓學生對人體吸收電磁能的量度有更清楚的剖析，以下將擇要說明，利用電場強度、導電性及質量密度與吸收率的關係，由式 2 給出：

$$SAR = \frac{\sigma|E|^2}{\rho} \quad (\text{式 2})$$

其中，E 為組織中電場的強度(V / m)， σ 和 ρ 為組織內的導電率(S / m)及質量密度(Kg / m³)。為了模擬所提出天線對人體手腕組織的影響，將上一章節的手部模型導入電磁模擬軟體進行 SAR 值分析，並在四個輸入端 Port 1 (5G FR1 n77/78/79 band), Port 2 (5G FR1 n77/78/79 band), Port 3 (WLAN 2.4/5G band) and Port 4 (GSM 850/900 & GPS 1575) 根據穿戴式和物聯網設備的建議，輸入功率設置為 17 dBm (50 mW)。

圖 19 顯示了在天線距離手腕 2 mm 的情況下，Ant 1 激發於 3600 MHz 的 SAR 值分佈，SAR 值主要分佈於-Z 及-Y 方向，這是由於 L-slot 的天線設計使地的電流主要集中於接地面及開槽孔處如圖 2.2(a)。

圖 20 顯示了 Ant 2 激發於 3600 MHz 時 SAR 值則是分佈於+Y 及-Y 兩側，由於 Ant 2 的 L-slot 天線所設計的位置為系統地中間，進而導致天線所激發電流朝+Y 及-Y 方向流動圖 2(c)。在 Ant 3 的設計為彎曲的金屬線耦合至金屬邊框並使輻射方向均朝-X 方向輻射，圖 21 顯示了相

同結果，Ant 3 於 2450 及 5650 MHz 激發時，SAR 值均分佈於-X 方向而有效的降低 SAR 極值。在 Ant 4 在 820 MHz 為直接饋入金屬邊框的單極模態、930 MHz 為 dual-open slot 模態，使 SAR 值分佈均集中於 +X 及-Y 方向，而 GPS 頻段(1575 MHz)在穿戴式裝置為接收天線，因此無需進行 SAR 值分佈與探討。評估時，使用電磁模擬軟體驗證了所提出天線 SAR 值均小於 FCC 設置的 10-g SAR 極限值 4 W 及 1-g SAR 的極限值 1.6 W 如表 2，證明了所提出天線在加入金屬錶帶後可有效的使輻射場型減少人體手腕方向輻射(-Z 方向)，使穿戴式裝置天線在實際應用手腕時均可維持 25%以上的美好輻射效率，有效的增加穿戴式裝置電池的續航能力並減少天線對於人體手腕組織的影響。

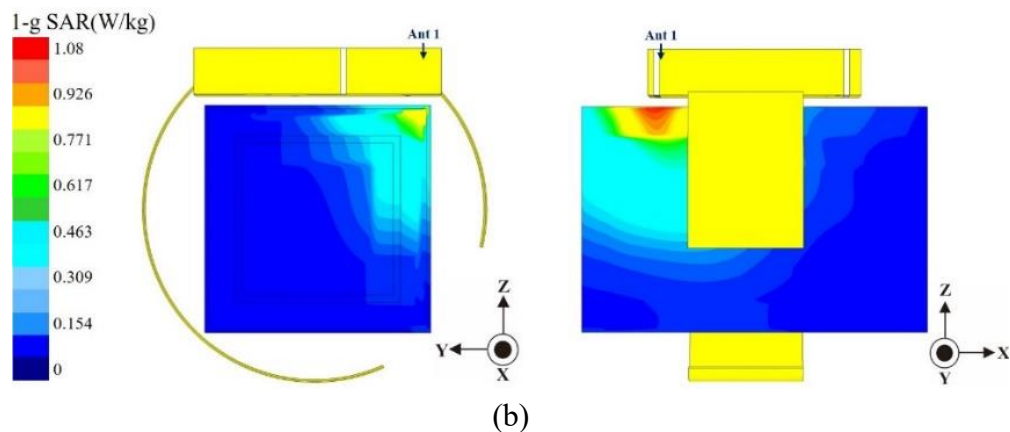
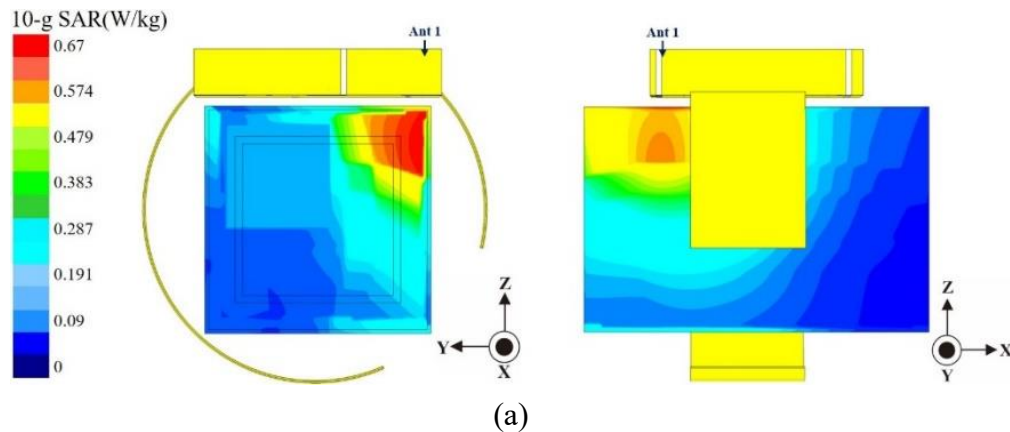
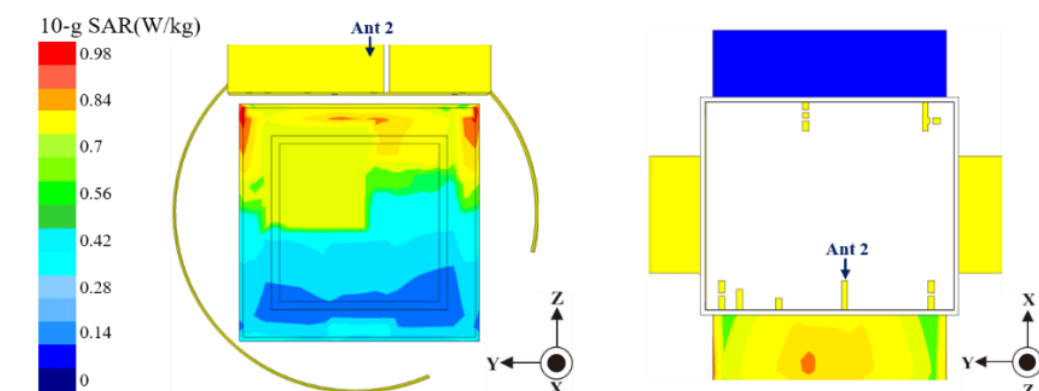
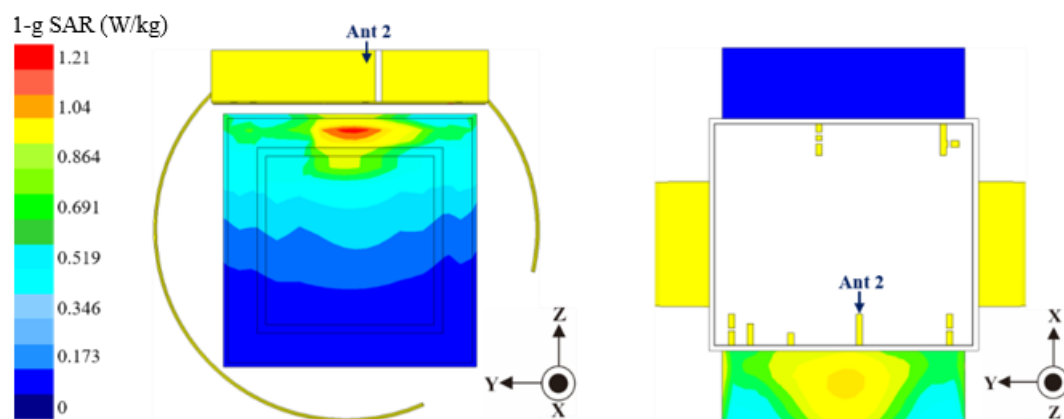


圖 19 穿戴式裝置 Ant 1 激發於 3600 MHz 的 SAR 值分佈圖

(a)10-g SAR (b)1-g SAR



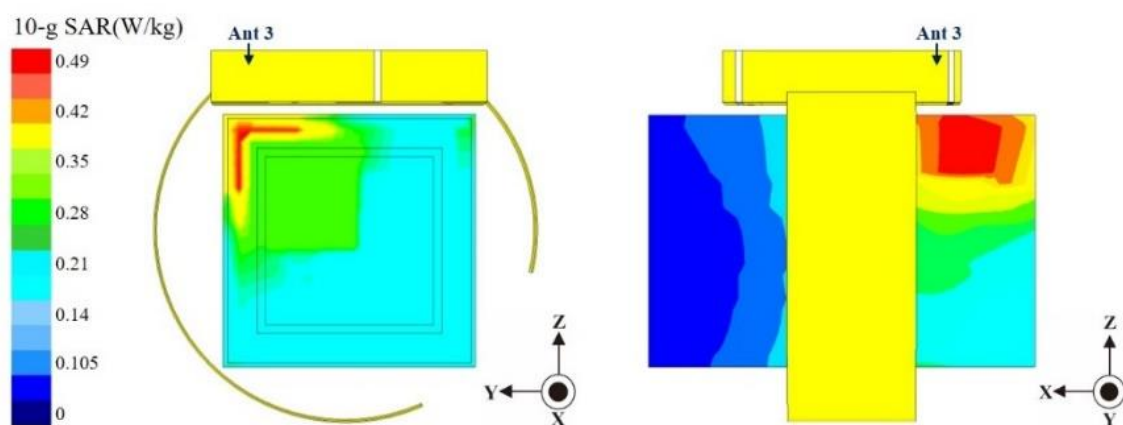
(a)



(b)

圖 20 穿戴式裝置 Ant 2 激發於 3600 MHz 的 SAR 值分佈圖

(a)10-g SAR (b)1-g SAR



(a)

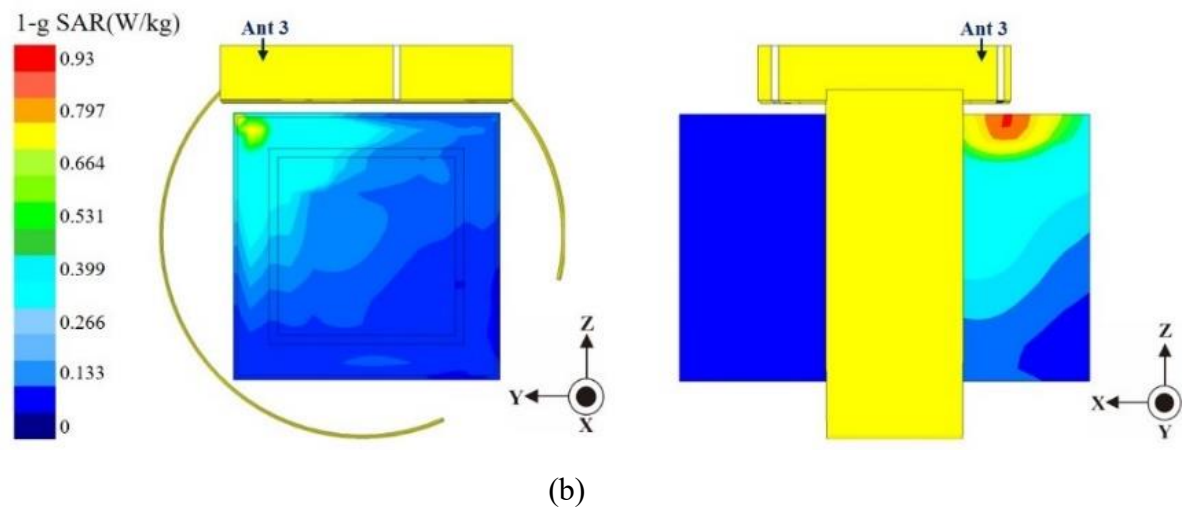


圖 21 穿戴式裝置 Ant 3 激發於 2450 MHz 的 SAR 值分佈圖
(a)10-g SAR (b)1-g SAR

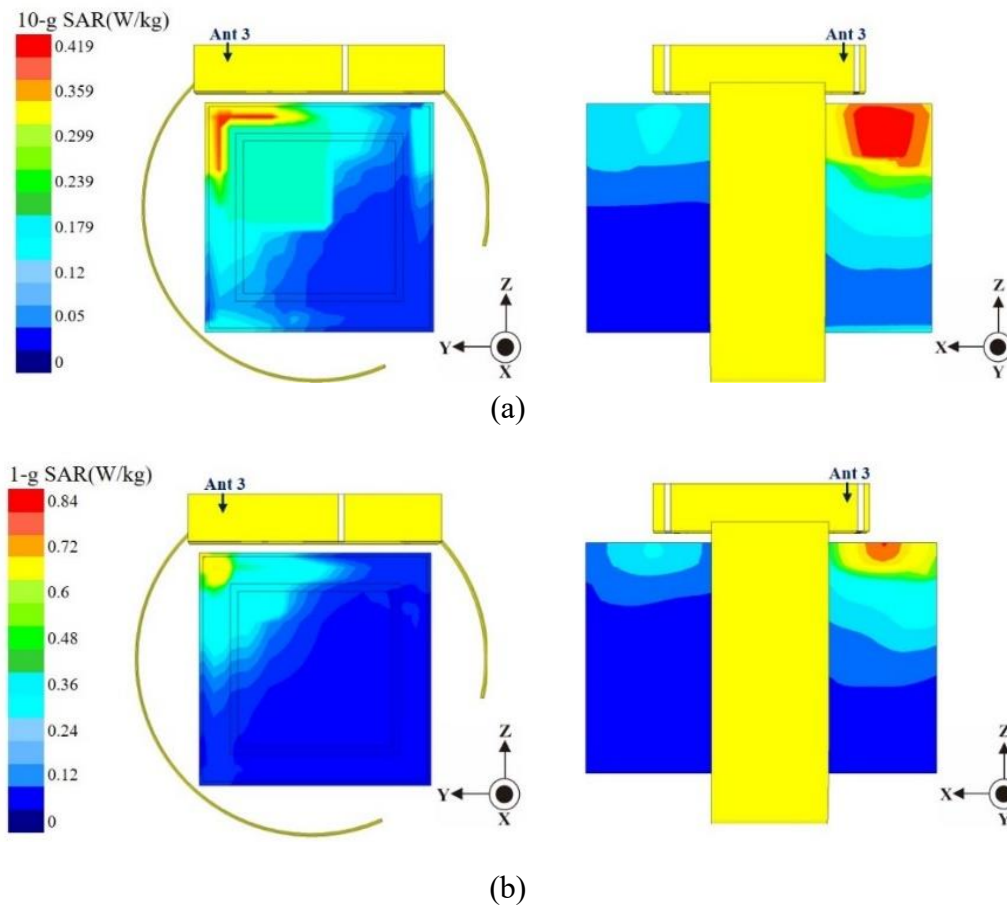
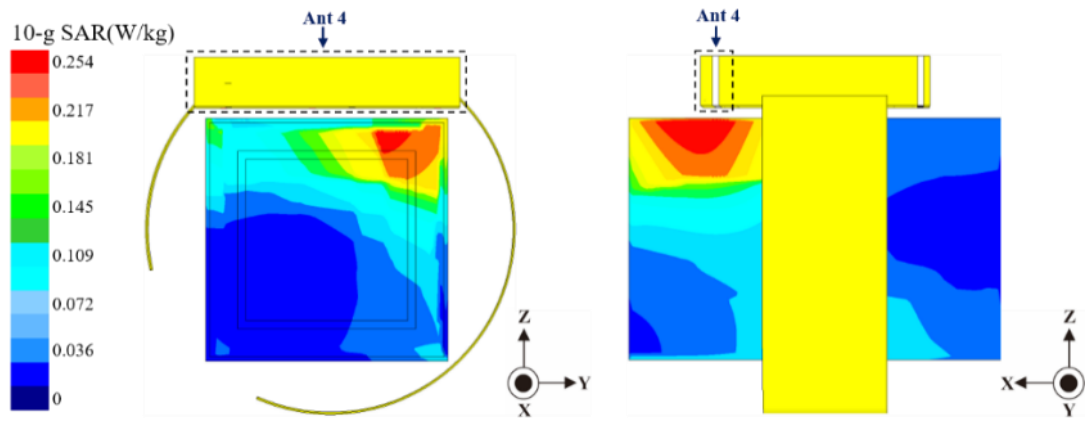
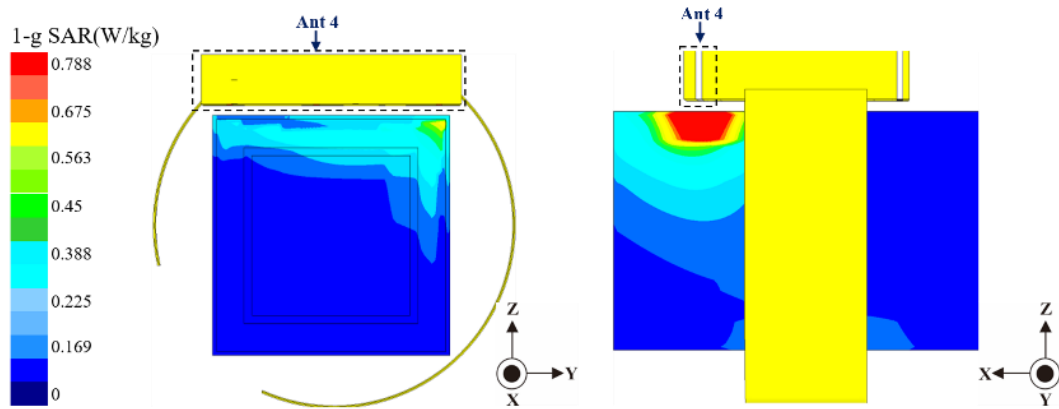


圖 22 穿戴式裝置 Ant 3 激發於 5500 MHz 的 SAR 值分佈圖
(a)10-g SAR (b)1-g SAR



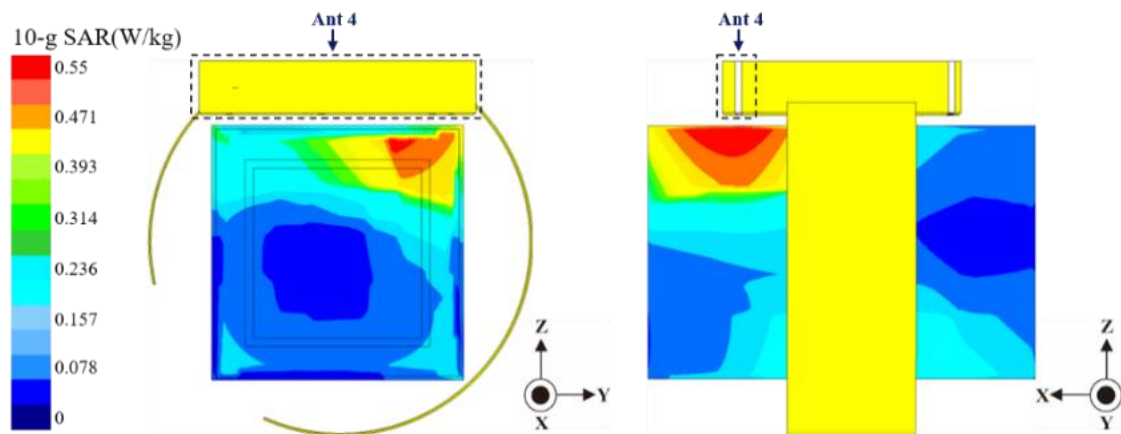
(a)



(b)

圖 23 穿戴式裝置 Ant 4 激發於 820 MHz 的 SAR 值分佈圖

(a)10-g SAR (b)1-g SAR



(a)

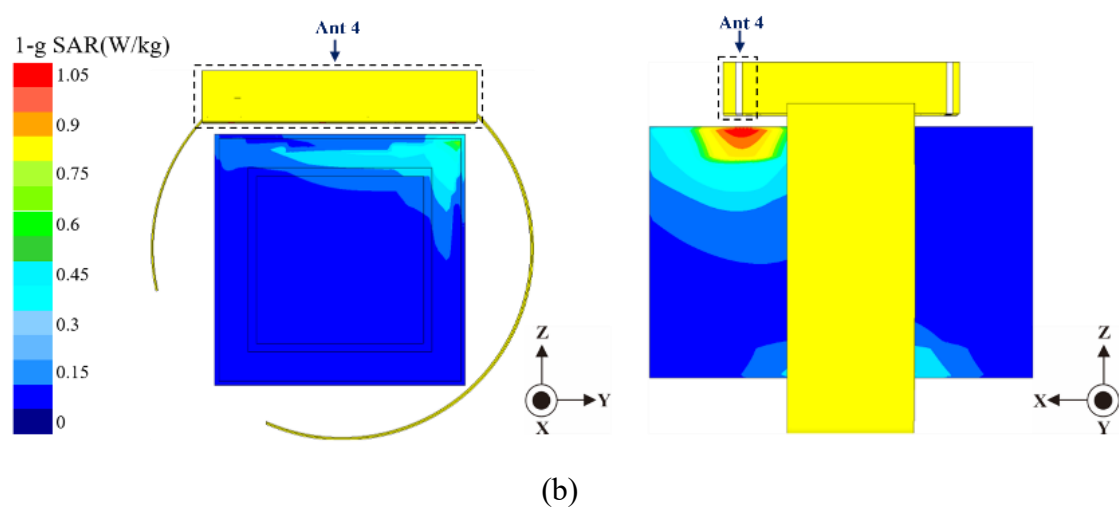


圖 24 穿戴式裝置 Ant 4 激發於 930 MHz 的 SAR 值分佈圖
(a)10-g SAR (b)1-g SAR

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<學生創新思維在智慧型穿戴裝置

天線設計中的應用>，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智慧型裝置天線之設計，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智慧型穿戴裝置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智慧型穿戴裝置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。

本研究將對適用於智慧穿戴型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，與貫徹「國防自主」與厚植國防產業的決心一致，奠定國防自主的基礎，達成滿足國防需求與強化國防科技發展與應用。

第五章 結論與未來展望

在本計畫中，智慧手錶天線的創新設計不僅在技術層面達到了突破，也在教學層面為軍事院校學生提供了嶄新的學習機會。通過多模態天線設計與電磁特性研究，學生們學會如何將理論與實踐相結合，應用於現實中的智能穿戴設備。同時，本計畫也促進了學生創新思維的發展，並強化了其實踐能力，讓他們能夠在快速變化的科技環境中脫穎而出。

本研究設計的智慧手錶天線，通過多頻段的整合和天線結構的優化，不僅具備良好的性能，更滿足了 5G 通信、物聯網 (IoT) 等先進技術的需求。該設計在提升天線效能的同時，也減少了電磁波的散發，有助於提升智慧手錶在軍事應用中的隱蔽性與可靠性。這些技術創新不僅對民用市場有著重要的參考價值，也為軍事通信技術的發展提供了寶貴的經驗和靈感。

未來展望方面，智慧手錶中的創新天線技術預期將會有更廣泛的應用。隨著物聯網技術的日益普及，智能穿戴設備的需求將不斷增長，而天線技術將在其中發揮關鍵作用。軍事應用中，智慧手錶天線設計將有助於提升士兵在各種作戰環境下的通信能力，尤其是在隱蔽性和低可偵測性方面，這些改進將大幅增強未來作戰的效能。

除此之外，天線技術的進一步發展將會考慮如何在更小的空間內實現更高效能，並支援更多的通信標準和頻段。未來的研究可進一步探討新材料與結構設計，以實現更高效的天線性能，甚至可以考慮將人工智慧 (AI) 技術引入天線設計過程中，以優化參數調整和性能預測。通過這些創新，智慧手錶天線技術將能夠在軍事和民用領域中發揮更大潛力。

本研究的智慧手錶天線設計不僅符合現今通信技術的需求，也在實際應用中展現出多樣化的潛力。隨著無線通信技術的不斷發展，智慧穿戴裝置的天線設計面臨著新的挑戰，包括小型化、低功耗、高效能以及多功能集成等。本計畫中的多模態多頻段天線設計，成功解決了在有限空間內如何整合多頻段通信的技術難題，並達到了 5G、物聯網等新興技術的標準。這使得智慧手錶能夠在不影響外觀設計的前提下，提升其通信效能，滿足更多應用場景的需求，特別是在軍事應用中顯得尤為重要。

從教學的角度來看，本計畫提供了一個創新的學習模式，將理論學習與實際操作相結合，讓學生能夠從實踐中學習如何設計、製作並測試天線。這種模式不僅提升了學生的動手能力，還鼓勵他們從創新角度思考技術問題。這些能力對於未來從事軍事科技研究的學生來說，至關重要，因為現代戰爭中高科技設備的應用越來越廣泛，技術創新

的需求也越來越迫切。透過這種創新教學模式，學生能夠更好地適應快速變化的技術環境，並在未來的職業生涯中保持競爭力。

此外，本研究所探討的智慧手錶天線技術也具備向其他軍事裝備延伸應用的潛力。未來，類似的技術可以應用於軍事無人機、穿戴式通訊設備甚至是戰場感測器等裝備中，這些裝備同樣需要具備小型化、高效能及低功耗的天線設計。透過這些應用，軍事人員可以在實際作戰中獲得更可靠的通信保障，提升戰場信息傳遞的效率和精度。總之，本計畫的成功實施，不僅推動了智慧手錶天線技術的進步，也為軍事院校教學模式的改革提供了範例。未來，隨著技術的進一步發展，這些創新成果有望對整個軍事科技領域產生深遠的影響，進一步促進國防自主和軍事技術的創新發展。

綜上所述，本研究不僅推動了智慧手錶天線技術的創新發展，也為軍事院校學生提供了寶貴的實踐機會和創新思維培養環境。未來隨著技術的進一步成熟，這些成果將有助於推動國防自主，並促進台灣軍事通信技術的全面發展。

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	協同主持人	空軍航空技術學院 航空通訊電子系	黃福隆	少校 講師	協助本案開發天線 S 參數與隔離度數值 量測實驗。
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	協助量測高頻數據 分析與研討
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	負責本案電波量測 作業與數值研究分析。
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	研究助理	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	二技班 學生助理	空軍航空技術學院 航空通訊電子系	羅欽璋	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	辦理本案行政作業 與量測作業所需整 備工作。
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	協助本案相關量測 作業與實驗整備。
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.智慧型穿戴裝置天線設計與分析												
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.濾波電路探討												
D4.匹配電路調整												
D5.實測驗證與分析												
E1.多天線特性評估												
E2.封包相關係數與評估												
E3.SAR 數值研討與分析												
E4.集成整合分析與探討												
E5.數值資料彙整與分析												
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，並榮獲銀牌。

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

2024 IIIC Silver Medal Award List 銀牌得獎名單

SID	Country	Inventor	Organization	Invention
297126	台灣	LIN I-MIN, LIN MING-WANG, LIU PO-WEI	東豐纖維企業股份有限公司	DUAL-SIDED FLUORINE-FREE WATER-REPELLENT MULTIFUNCTIONAL PROCESSED FABRIC AND ITS MANUFACTURING METHOD
299015	台灣	You-Ping Wang, Jer-An Guo, Jui-Chen Cheng, Hsiu-O Kao	台灣大學醫學院附設醫院	Adjustable oxygen adapter
300236	台灣	Chung-Wen Kuo, Tzi-Yi Wu, Shang-Cheng Kuo, Jenq-Nan Yih, Yuan-Zhan Lu, Meng-Hong Chen	國立高雄科技大學	Electrosynthesis of copolymer based on 9,9'-(oxybis([1,1'-biphenyl]-4',3-diyl)) bis(9H-carbazole) and 2,2'-bithiophene for electrochromic device
308707	台灣	Shu-Yun Sheu, Chao-Min Cheng, Chung-Hsiang Lin	國立清華大學	Antibacterial efficacy of nanostructures
308722	台灣	Chih-Hsien Lai, Wen-Hao Chen, Jung-Chuan Chou, Po-Hui Yang, Yu-Hsun Nien, Po-Yu Kuo	國立雲林科技大學	Exploring the Utilization of Molybdenum Disulfide Nanosheets in the Photoanode of Dye-Sensitized Solar Cells.
308767	台灣	Chia-Te Liao, Zhe-Kai Yang, Hua-Ming Chen, Ying-Yu Liao, Kun-Cheng Cai, Huang-Fu Lung	空軍航空技術學院	Energy-efficient and high-performance multi-antenna design for smart wearable devices incorporating a metal watch frame

參考文獻

- [1] M. Fan, C. Wen, and J. Tang, "Design of a smartwatch for IoT application under 5G environment," *2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)*, vol. 1, pp. 306-309, 2020.
- [2] GIGABYTE. Multi-access Edge Computing Available:
<https://www.gigabyte.com/tw/Glossary/mobile-edge-computing>
- [3] S.-Y. Lien, S.-L. Shieh, Y. Huang, B. Su, Y.-L. Hsu, and H.-Y. Wei, "5G new radio: waveform, frame structure, multiple access, and initial access," *IEEE communications magazine*, vol. 55, no. 6, pp. 64-71, 2017.
- [4] N. Javaid, A. Sher, H. Nasir, and N. Guizani, "Intelligence in IoT-based 5G networks: opportunities and challenges," *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 10, pp. 94-100, 2018.
- [5] User Equipment (UE) Radio Transmission and Reception; Part 2: range 2 standalone (Release 15), document TS38.101-2 v15.0.0, Jun. 2018.
- [6] Sulyman, A. T. Nassar, M. K. Samimi, G. R. MacCartney, T. S. Rappaport, and A. Alsanie, "Radio propagation path loss models for 5G cellular networks in the 28 GHz and 38 GHz millimeter-wave bands," *IEEE communications magazine*, vol. 52, no. 9, pp. 78-86, 2014.
- [7] W.-Y. Li, W. Chung, and K.-L. Wong, "Highly-integrated dual-band mmWave antenna array for 5G mobile phone application," *2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pp. 1-5, 2020.
- [8] D. Wu and S. Cheung, "A cavity-backed annular slot antenna with high efficiency for smartwatches with metallic housing," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 7, pp. 3756-3761, 2017.
- [9] B. Wang and S. Yan, "Design of smartwatch integrated antenna with polarization diversity," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 123440-123448, 2020.
- [10] C. H. Chen, Y. F. Lin, P. W. Huang, H. M. Chen, and C. T. Liao, "Design of multi-band antenna for LTE wearable device with shared slots and radiators for smart watch," *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 30, no. 11, p. e22415, 2020.
- [11] S. W. Su and Y. T. Hsieh, "Integrated LDS antenna for B 13 and B 4/B 3/B 2/B 1 LTE operation in smartwatch," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 59, no. 4, pp. 869-873, 2017.
- [12] D. Wen, Y. Hao, H. Wang, and H. Zhou, "Design of a MIMO antenna with high isolation for smartwatch applications using the theory of characteristic modes," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 3, pp. 1437-1447, 2018.

- [13] S.-W. Su and Y.-T. Hsieh, "Integrated metal-frame antenna for smartwatch wearable device," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 7, pp. 3301-3305, 2015.
- [14] Z. Duan and L. J. xu, "Dual band wristband antenna with metal frame loaded for biomedical applications," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 59, no. 9, pp. 2155-2159, 2017.
- [15] C. H. Wu, K. L. Wong, Y. C. Lin, and S. W. Su, "Internal shorted monopole antenna for the watch-type wireless communication device for Bluetooth operation," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 49, no. 4, pp. 942-946, 2007.
- [16] K. Zhao, Z. Ying, and S. He, "Antenna designs of smart watch for cellular communications by using metal belt," *2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pp. 1-5, 2015.
- [17] L.-J. xu and Z. Duan, "Differential wide band metal-frame antenna for wristband applications," *2016 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP)*, pp. 1-3, 2016.
- [18] D. Wu, S. Cheung, Q. Li, and T. Yuk, "Slot antenna for all-metal smartwatch applications," *2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pp. 1-4, 2016.
- [19] W. R. Deal, N. Kaneda, J. Sor, Y. Qian, and T. Itoh, "A new quasi-Yagi antenna for planar active antenna arrays," *IEEE transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 48, no. 6, pp. 910-918, 2000.
- [20] Y.-H. Suh and K. Chang, "A new millimeter-wave printed dipole phased array antenna using microstrip-fed coplanar stripline tee junctions," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 52, no. 8, pp. 2019-2026, 2004.
- [21] J.-Y. Shim, J.-G. Go, and J.-Y. Chung, "A 1-D tightly coupled dipole array for broadband mmWave communication," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 8258-8265, 2019.
- [22] S. x. Ta, H. Choo, and I. Park, "Broadband printed-dipole antenna and its arrays for 5G applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 2183-2186, 2017.
- [23] S. Zhu, H. Liu, Z. Chen, and P. Wen, "A compact gain-enhanced Vivaldi antenna array with suppressed mutual coupling for 5G mmWave application," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, no. 5, pp. 776-779, 2018.
- [24] H. Liu, W. Yang, A. Zhang, S. Zhu, Z. Wang, and T. Huang, "A miniaturized gain-enhanced antipodal Vivaldi antenna and its array for 5G communication applications," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 76282-76288, 2018.
- [25] J. Bang and J. Choi, "A compact hemispherical beam-coverage phased array antenna unit for 5G mm-wave applications," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 139715-139726, 2020.
- [26] H. Koo and S. Nam, "Mechanism and elimination of scan blindness in a T-Printed dipole array," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 1, pp.

242-253, 2019.

- [27] K.-L. Wong, H.-J. Chang, C.-Y. Wang, and S.-Y. Wang, "Very-low-profile grounded coplanar waveguide-fed dual-band WLAN slot antenna for on-body antenna application," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 1, pp. 213-217, 2019.