

## 金屬狹縫在GSM和WLAN通訊頻帶的電磁阻隔特性研究

蘇文寬<sup>1\*</sup> 朱景華<sup>2</sup> 鄭益昌<sup>3</sup> 盧信霖<sup>1</sup>

<sup>1</sup>國防大學理工學院電機工程學系

<sup>2</sup>國防大學理工學院國防科學研究所

<sup>3</sup>萬能科技大學電子資訊學院

### 摘 要

本論文主要是研究金屬狹縫的電磁防護特性，透過高頻結構模擬軟體（High Frequency Structure Simulation）對狹縫的幾何結構和材質變化，在全球行動通訊系統(900 及 1800MHz)及無線區域網路(2.4GHz)等無線電通訊頻帶之阻隔特性進行反射率的模擬並進行相關之實驗量測，從結果得知增加狹縫之有效厚度及在狹縫周圍添加耗損性材質，能有效降低電磁波之狹縫滲漏，可用於防範無線通訊基地台之電磁輻射對人員損傷及對精密儀器之干擾。

**關鍵詞：**電磁屏蔽，狹縫，全球行動通訊系統，無線區域網路，無線通訊基地台

## Study of the Characteristics of Electromagnetic Shielding with Metallic Slot in the Band of Global System for Mobile Communications and Wireless Local Area Network

Wen-Kuan Su <sup>1\*</sup>, Jin-Hwa Ju <sup>2</sup>, Yi-Chang Chen <sup>3</sup>, and Sin-Lin Lu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Department of Electronic Engineering, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University*

<sup>2</sup> *Graduate School of National Defense Science, Chung-Cheng Institute of Technology, National Defense University*

<sup>3</sup> *Department of Electro-Optical Engineering Vanung University*

### ABSTRACT

This study illustrates the characteristics of electromagnetic shielding with various slots. According to the simulation results with high-frequency structure simulation (HFSS) software and the experimental results with R&S ZA-40 Network Analyzer, we can get the electromagnetic shielding characteristics in Global System for Mobile Communications (900MHz and 1800MHz) and Wireless Local Area Network (2.4GHz). It is useful as a reference to reduce the damages of people exposed in the radiation environment and protect precision instrument breakdown from electromagnetic wave interference of mobile phone base stations.

**Keywords:** electromagnetic shielding, global system for mobile communications, slot, wireless local area network, mobile phone base stations

文稿收件日期 98.11.13 文稿修正後接受日期 99.3.23; \*通訊作者

Manuscript received November. 13, 2009; revised March. 23, 2010; \* Corresponding author

## 一、前言

近年來隨著科技的發展，各種電子產品已悄悄的佈滿人類的生活圈，成為不可或缺的產品。人們在享受電子科技之便利性的同時，無形中也將自身沉浸於各種人為的電磁波海中而不自知。舉凡微波爐、行動電話、無線通訊、電視、電腦等都是電磁波輻射來源。目前有許多科學數據顯示長期暴露於具有特定頻率之電磁波環境中，對生命財產可能造成嚴重的危害，雖然還不能明確界定各種電磁波對人體影響的程度，但美國聯邦通訊委員會(FCC, Federal Communications Commission)及加拿大已採用 IEEE/ ANSI C95.1 規範的建議，來確保人體最大之電磁波能量吸收比值(SAR, Specific Absorption Rate)值。在各種人為電磁輻射的汙染問題中，目前是以行動通信基地台的最為嚴重且棘手。基地台的成長顯示無線通訊技術的發達及普及化，對國家競爭力有著指標性的意義，根據統計，行動通訊基地台(Mobile Phone Base Stations)的數量已暴增到五萬個以上，它所帶來的經濟效益，已足夠將台灣推向先進國家的行列。然而，如影隨形的電磁輻射卻無形中帶給國人生命財產極大的隱憂。目前採取增強電磁波訊號或隱匿基地台位置等消極的作為，不但無法消除電磁波所帶來的威脅，反而失去人們的信任，可謂得不償失。在科技發展與民生需求的平衡之下，提出適當的防制作為已成為時下重要的議題之一。

本論文的研究重點在於屏蔽體縫隙之電磁波防護特性的探討，狹縫是指結構體中的狹小通道，它在結構體中有其必要和必然性，但是因通道中介質的介電常數是遠小於結構體的材料。又因為電磁波在不連續的介質界面所存在的繞射現象，使得電磁波可說是無孔不入，故電磁波可以從狹縫中自由滲透入屏蔽體。因此，孔洞的存在會嚴重影響電磁波防護之效能。為了提升結構體的防護效能，許多學者已提出許多防治作為[1-8]。1998年，Robinson的研究群利用數值運算及實體量測的方法，探討電磁波經孔洞耦合進入屏蔽體內情形，並提出屏蔽體之狹縫對頻率在 1GHz 以下的電磁波防護效能之計算模式[1]。然而該文並不包括行動通訊基地台所輻射之電磁波的頻帶亦即是在全球行動通訊

系統(GSM, Global System for Mobile Communications)和無線區域網路(Wireless Local Area Network)的範圍，因此吸引我們對此頻帶的研究興趣。雖然頻率不同(1800MHz及 2.4GHz)，該模式依然可作為研究電磁防護效能之參考。根據電磁波之輻射特性可知，電磁波穿過孔洞之強度大小與頻率有關。對特定頻率之電磁波的防護體，並不需要完全之導體封閉面，可視結構體功能和防護需求而開設適合尺寸之孔洞，仍能達到防護效能。又根據疊加原理，也可以利用導電材料將屏蔽體上之孔洞阻隔成細小之孔洞來達到兼具通風或採光的電磁屏蔽結構。

本論文先以研究鋁金屬導板的電磁輻射特性及防護結構之設計，透過高頻結構模擬軟體(HFSS)之模擬及實驗結果，獲得了鋁金屬導板之狹縫對 GSM(900、1800MHz)及無線區域網路(2.4GHz)等無線電通訊頻帶之防護特性參數。再研究模擬鋁金屬狹縫之電磁阻隔特性開始，從而由狹縫的幾何結構和材質等參數變化的影響，用以獲取設計電磁屏蔽體之各種孔洞結構參數，未來再輔以實驗驗證，以利電磁防護效能之提升。

## 二、理論介紹

高頻電磁屏蔽原理，主要是基於電磁波穿過金屬屏蔽體所產生波的反射與吸收，電磁波傳播到屏蔽體表面時，之所以會產生反射，其主要原因是電磁波的波阻抗與金屬屏蔽體的特徵阻抗不相等，兩者差距越大，反射所引起的損耗也就越大[6]。電磁波穿越金屬屏蔽材料之反射率也與頻率有關，相同之結構體對不同頻率之電磁波而言，會呈現不同的屏蔽效能。而電磁波在穿透屏蔽體時產生的吸收損耗，主要是由電磁波在屏蔽體中的感應電流引起。感應電流可產生一個反磁場抵抗原干擾磁場，同時，電流也會在屏蔽體內產生熱損耗，頻率越高，屏蔽體越厚，電流損耗也越大[9-10]；除此之外，電磁波穿過屏蔽層時，有時會產生多次反射。

屏蔽的結構中最常見的孔洞就是狹縫，狹縫兩端的電位差大小，將決定縫隙的輻射特性，所以狹縫所在的位置和大小是決定屏蔽效能的主要因子[11-14]。對一線性極化波而言，在相同狹縫面積的情況下，狹縫的洩

漏比孔洞還嚴重，其中主要是磁場的洩漏。為了有效的屏蔽進入屏蔽區的磁場，屏蔽層中感應電流的分佈需求與所要抵銷的磁場相同，如果屏蔽體中有狹縫的存在，則必然會影響電流的分佈狀態。如果狹縫的長度比較長，它導致電流分佈的偏移，可能比一排小孔造成的影響還大[15-18]，如果狹縫長軸垂直電流流向，則引起電流分佈的偏移量更大，如圖 1 所示。

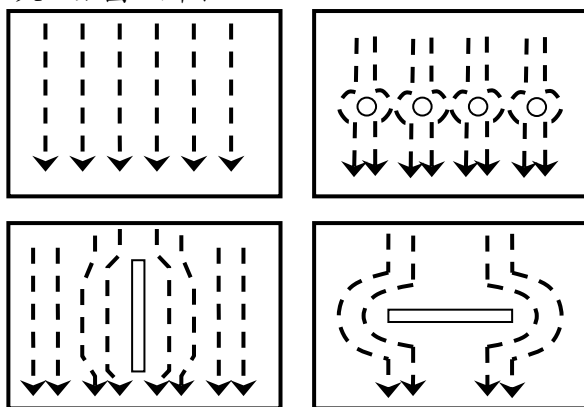


圖 1. 導體表面孔洞及狹縫電流流向示意圖。

Babinet's Principles 是一種光學原理，其原理是說：開口屏蔽層後的場與其互補結構的場相加，其和等於無屏蔽時的場。當電磁波由內(外)向外(內)通過一具有單狹縫之屏蔽層時，其後之 field，就如同一 dipole 輻射的電磁場一般，只是電場和磁場的方向會旋轉 90°，換句話說，一水平的狹縫，如同一垂直的 dipole[19]，因此，屏蔽體本身將可能成為一個由內部電磁場饋入之有效的電磁波輻射源或天線。

狹縫對屏蔽影響的大小，與它的長度相關，具有狹縫的薄屏蔽結構，其屏蔽效率 SE 的公式可以用(1)式表示[20]。

$$SE = 20 \log \left( \frac{\lambda}{2l} \right) + 27.2 \left( \frac{t}{l} \right) \quad (1)$$

其中， $l$  為狹縫的長度， $\lambda$  為波長， $t$  為屏蔽層厚度。(1)式第一項可以看成是薄屏蔽層上小孔對波的反射損耗，第二項可以看成是壁厚的吸收損耗。

### 三、理論模擬及實驗

由電磁理論可知道當電磁波通過一具有

單狹縫之屏蔽層時，就如同一電偶極的電磁輻射場一般，只是電場和磁場的方向會旋轉 90°，換句話說，一水平的狹縫，如同一垂直的電偶極，因此，屏蔽體本身將可能成為一個有效的電磁波輻射器。且當狹縫長度為中心頻率二分之一波長並垂直於入射波之電場方向時，此時電磁波的洩漏最嚴重，為改善電磁波洩漏情形，首先，我們以透過高頻結構模擬軟體的協助，進行理論模擬分析狹縫之電磁波洩漏情形，我們先對鋁金屬導板之電磁防護特性施作電腦模擬與實驗量測。其中，狹縫寬度分別為 3mm、5mm、7mm、9mm，實際來瞭解其電磁現象，再將其應用於屏蔽體狹縫的電磁阻隔特性研究，並以實驗方式進行驗證。實測量測設置如下：

- (1)利用兩根號角天線分別做為電磁波信號的發射端及接收端。
- (2)將待測物固定於屏蔽體上。
- (3)將待測物置於兩根號角天線中央，天線與待測物距離與模擬設定距離一樣，設定在二分之一波長處，並使用網路分析儀進行量測，量測設置如圖 2，其中網路分析儀的型號是 R&S ZA-40。
- (4)擷取網路分析儀量測之 S21 值，以探討待測物之電磁防護特性，並與理論模擬之數值做分析比較。

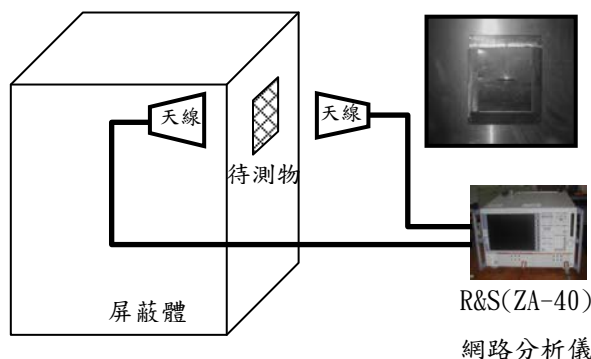


圖 2. 實驗量測設置圖。

為了減少屏蔽體之狹縫的電磁滲漏問題，我們後續分別針對狹縫的垂直厚度變化以及在狹縫周圍增加耗損性介質等兩種情況的電磁波穿透特性的影響來實施電腦模擬研究，作為未來實際電磁防護之參考依據。

### 四、結果與討論

由理論分析可知，當鋁金屬導板中存在垂直入射電場波震盪方向之狹縫時，狹縫處會產生如線性偶極天線之輻射場型。嚴重影響屏蔽體之電磁波的屏蔽效果。由模擬結果可知，當狹縫長度為中心頻率波長的二分之一時，電磁波洩漏最嚴重，因此我們以二分之一波長之狹縫為主，進行下列三種結構的研究分析：

#### 4.1 鋁金屬導板之電磁防護特性探討

理論模擬方面，在空氣中，電磁波能量可以從發射面完全傳遞到接收面，當一矩形波導中放入一片 1mm 厚之鋁金屬導板，在 900MHz、1800MHz 及 2.4GHz 等三個頻段，由圖 3 可以清楚瞭解電磁波無法穿過鋁金屬導板，由理論分析可知，當鋁金屬層中有狹縫存在並垂直入射電磁波電場方向時，狹縫處會產生天線效應，形成一個電磁波輻射器，電磁波洩漏將會嚴重影響屏蔽效果，由圖 4 狹縫之場型分佈圖可獲得驗證；在實測方面，待測物為有狹縫之鋁金屬導板，其中，僅對會造成電磁波嚴重洩漏之狀況(即鋁金屬導板上之狹縫垂直於入射波之電場方向)加以討論分析，由圖 5 及圖 6 理論模擬與實驗結果可知，狹縫長度對屏蔽層屏蔽效能的影響以狹縫尺寸為中心頻率二分之一波長且入射波電場方向垂直狹縫時，電磁波的洩漏最為嚴重，其中，狹縫寬度分別為 3mm、5mm、7mm、9mm，對電磁波洩漏影響較不明顯，因此，後續之改進措施之方法，模擬架構以狹縫尺寸為 900MHz、1800MHz 及 2.4GHz 等三個中心頻率的二分之一波長時為主，寬度為 3mm。

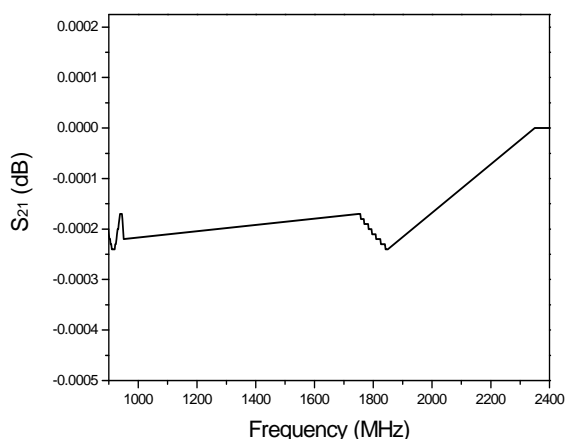


圖 3. 模擬電磁波空氣中頻率與 S21 關係圖。

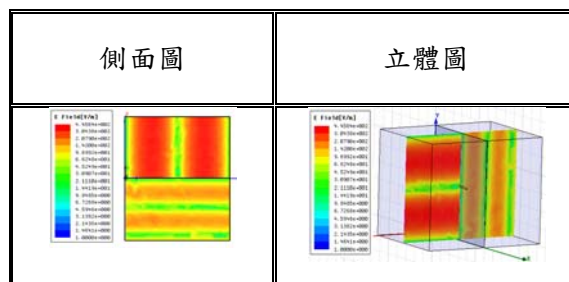


圖 4. 模擬鋁金屬導板上狹縫之電場分佈圖。

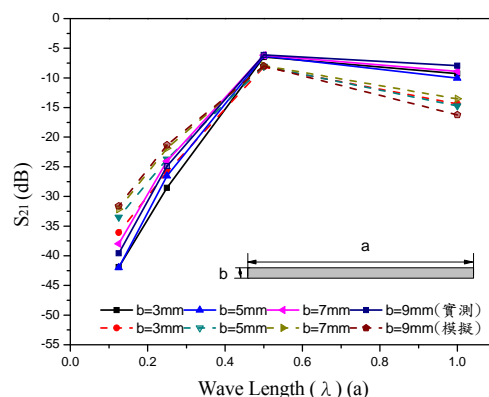


圖 5. 鋁金屬導板上不同尺寸狹縫電磁波洩漏模擬與實測比較圖(1800MHz)。

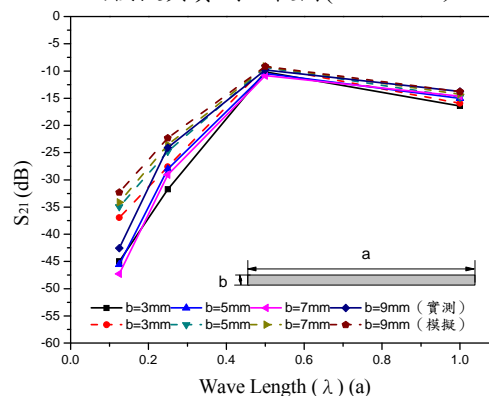


圖 6. 鋁金屬導板上不同尺寸狹縫電磁波洩漏模擬與實測比較圖(2.4GHz)。

由以上實驗與模擬結果可知，當狹縫長度為中心頻率波長的二分之一時，電磁波洩漏最嚴重，因此，後續我們將以二分之一波長之狹縫為主進行探討，並以模擬方式探討抑制電磁波洩漏之方法，提出可行之改善方案，其中，我們探討的方法將建立在電磁理論中導波管及傳輸線的基本理論，透過理論應用，抑制電磁波洩漏情況。

#### 4.2 屏蔽體上狹縫處之垂直厚度變化

根據電磁理論，增加狹縫處垂直方向之

有效厚度，狹縫將變成如導波管形狀，有利防止特定頻率之電磁波滲漏。模擬時，首先將中心頻率分別設定為 900MHz、1800MHz 及 2400MHz，狹縫長度為二分之一波長，寬度 3mm，有效厚度為 1mm~20mm，且狹縫有效厚度區分為靠近發射端、靠近接收端及兩端等三種狀況。由圖 7 至圖 9 的模擬結果可知，在 900MHz、1800MHz、2400MHz 等三個頻段，增加狹縫厚度能有效抑制電磁波洩漏狀況，有效厚度越大電磁波抑制狀況越佳。

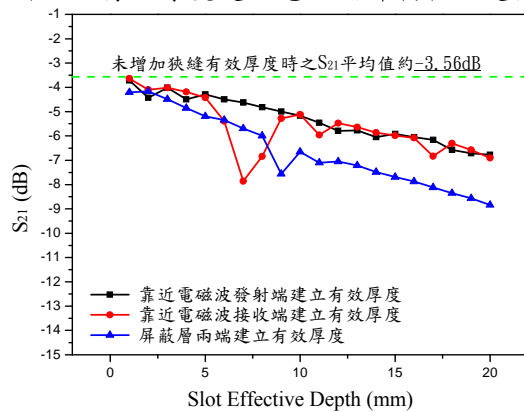


圖 7. 狹縫有效厚度與電磁波穿透損失比較圖(900MHz)。

屏蔽層兩端皆建立狹縫之有效厚度抑制電磁波洩漏情形最佳，而有效厚度建立在靠近接收端或發射端時，抑制電磁波洩漏狀況差別不大，其中較特別的是，在 900MHz 頻段，有效厚度為 7mm 與 8mm，建立在靠近接收端時，其電磁波抑制效果較其他兩種狀況更好，我們推斷應是導波管截止頻率之關係而影響電磁波穿透，使 S21 平均值降低。由理論模擬結果可知增加狹縫有效厚度，可以有效抑制電磁波洩漏且狹縫有效厚度越深，其屏蔽效果越明顯。

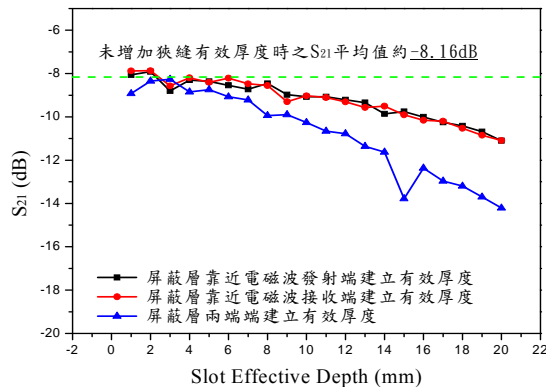


圖 8. 狹縫有效厚度與電磁波穿透損失比較圖(1800MHz)。

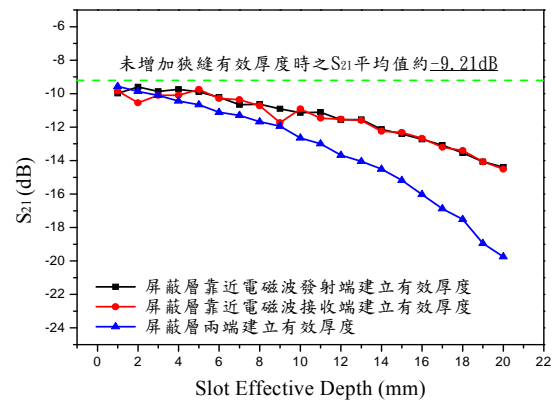


圖 9. 狹縫有效厚度與電磁波穿透損失比較圖(2.4GHz)。

### 4.3 在狹縫周圍增加耗損性介質

當電磁波從發射面發射時，會耦合至狹縫處並對外輻射，根據傳輸線理論，我們將狹縫視為一驅動電源，分別驅動屏蔽層內部與外部之電流，如圖 10 所示，因此，如果在狹縫四周增加耗損性材質，改變狹縫阻抗，將可以改變表面電流分佈，達到衰減狹縫之電磁波輻射之目的。當模擬時，我們將中心頻率分別設定為 900MHz、1800MHz 及 2.4GHz，狹縫長度為二分之一波長，寬度 3mm，並在狹縫四周加上一耗損性材質，我們將分別從耗損性材質的面積大小、厚度、導電率及介電係數來探討其抑制電磁波洩漏的效果，模擬架構如圖 11。

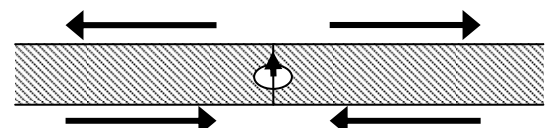


圖 10. 孔洞傳輸線理論示意圖。

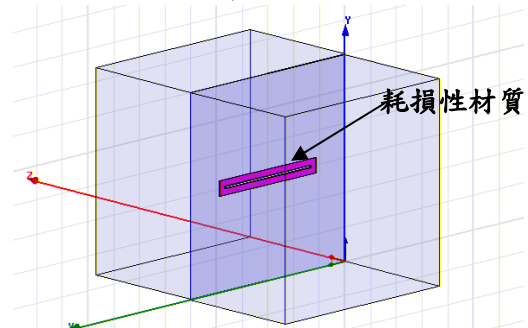


圖 11. 狹縫周圍添加耗損性材質模擬架構圖。

#### 4.3.1 耗損性材質介電係數

表 1 是改變耗損性材質介電係數大小之

模擬參數表，我們依據不同的介電係數所模擬出來的結果，發現其 S21 數值皆未改變，由此可知，耗損性材質之介電係數不是影響抑制電磁波之關鍵因素，故接下來之模擬，我們將耗損性材質之介電係數設定為 4 來做討論。

表 1. 耗損性材質介電係數模擬參數設定表

介電係數 $\epsilon$	磁導率 $\mu$	導電率 $\sigma$ (S/m)	距離 mm	厚度 mm
4	1	5	10	<< 1
8				
16				
32				
64				
128				

#### 4.3.2 耗損性材質導電率變化

因為耗損性材質的介電係數並不會影響抑制電磁波之效果，故接著我們嘗試改變導電率，並將耗損性材質加在鋁金屬導板之兩端來觀察其抑制電磁波之變化，表 2 是改變耗損性材質導電率之模擬參數表，由圖 12 可知，導電率越高其抑制電磁波效果並沒有越好，反而越差，故我們將導電率設定在 5(S/m)。

表 2. 耗損性材質導電率模擬參數設定表

介電係數 $\epsilon$	磁導率 $\mu$	導電率 $\sigma$ (S/m)	距離 mm	厚度 mm
4	1	5	10	<< 1
		$5 \times 10^2$		
		$5 \times 10^4$		
		$5 \times 10^6$		
		$5 \times 10^8$		

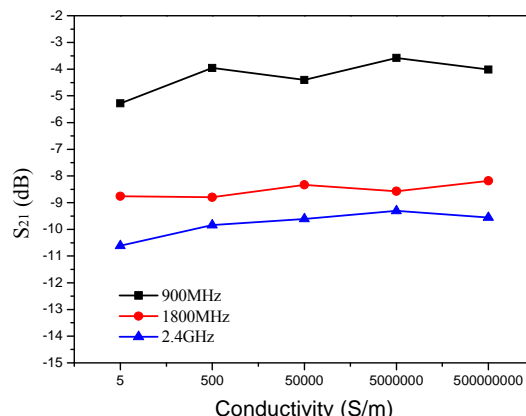


圖 12. 改變耗損性材質導電率之 S21 比較圖。

#### 4.3.3 耗損性材質寬度變化

表 3 是耗損性材質寬度變化之模擬參數表，依照此表模擬所得出之結果(如圖 13 至圖 15)，可以看出，在 900MHz 頻段附近，當耗損性材質加在鋁金屬導板靠近電磁波發射端時，耗損性材質添加在距狹縫四周 40mm 時抑制電磁波效果最好，約可降低 1.2dB，當耗損性材質加在鋁金屬導板靠近電磁波接收端時，耗損性材質添加在距狹縫四周 10mm 時抑制電磁波效果最好，約可降低 1.4dB，在兩端都加上耗損性材質時，耗損性材質添加在距狹縫四周 50mm 時抑制電磁波效果最好，約可降低 2.2 dB。

表 3. 耗損性材質寬度變化之模擬參數設定表

介電係數 $\epsilon$	磁導率 $\mu$	導電率 $\sigma$ (S/m)	寬度 mm	厚度 mm
4	1	5	10	<< 1
			20	
			30	
			40	
			50	
			60	

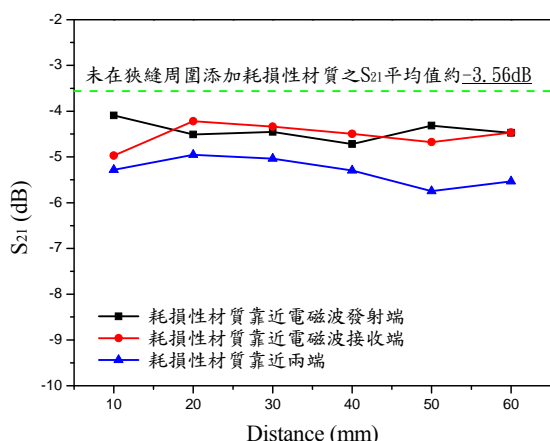


圖 13. 改變耗損性材質寬度之 S21 比較圖 (900MHz)。

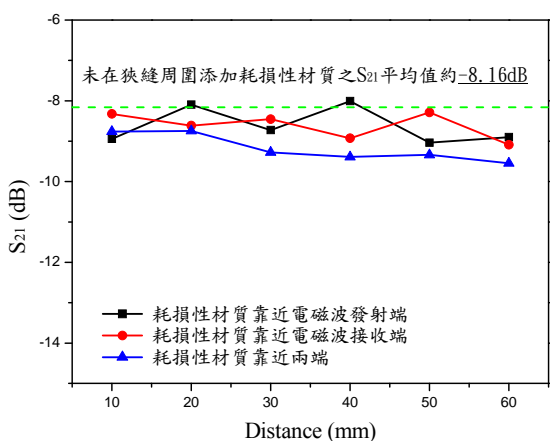


圖 14. 改變耗損性材質寬度之 S21 比較圖 (1800MHz)。

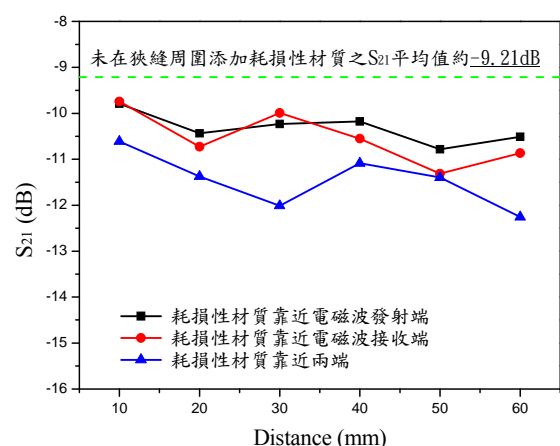


圖 15. 改變耗損性材質寬度之 S21 比較圖 (2.4GHz)。

在鋁金屬導板靠近電磁波接收端時，耗損性材質添加在距狹縫四周 60mm 時抑制電磁波效果最好，約可降低 0.93dB，在兩端都加上耗損性材質時，耗損性材質添加在距狹縫四周 60mm 時抑制電磁波效果最好，約可降低 1.39dB，在 2400MHz 頻段附近，當耗損性材質加在鋁金屬導板靠近電磁波發射端時，耗損性材質添加在距狹縫四周 50mm 時抑制電磁波效果最好，約可降低 1.57dB，當耗損性材質加在鋁金屬導板靠近電磁波接收端時，耗損性材質添加在距狹縫四周 50mm 時抑制電磁波效果最好，約可降低 2.1dB，在兩端都加上耗損性材質時，耗損性材質添加在距狹縫四周 60mm 時抑制電磁波效果最好，約可降低 3.05dB。綜合上述，將耗損性材質加在狹縫四周時，不論靠近電磁波發射端或靠近接收端，其抑制電磁波的效果差別並不會很大，而在狹縫兩端四周都添加耗損性材質時，其抑制電磁波的效果會較佳，但相對的也會比較耗費成本。

#### 4.3.4 耗損性材質厚度

表 4 是改變耗損性材質厚度大小之模擬參數表，依照此表模擬所得出之結果如圖 16 至圖 18 述內容相同，將耗損性材質加在鋁金屬導板靠近電磁波發射端或接收端時，其抑制電磁波的效果差別不大，在兩端都加上耗損性材質時，其抑制電磁波的效果會較佳。同理，添加在狹縫四周之耗損性材質，已有抑制電磁波洩漏之效果，當其厚度越厚，其抑制電磁波洩漏效果會越好。

表 4. 改變耗損性材質厚度模擬參數設定表

介電係數 $\epsilon$	磁導率 $\mu$	導電率 $\sigma$ (S/m)	距離 mm	厚度 mm
4	1	5 S/m	10mm	$\ll 1$ mm
				1mm
				2mm

1800MHz 頻段附近，當耗損性材質加在鋁金屬導板靠近電磁波發射端時，耗損性材質添加在距狹縫四周 50mm 時抑制電磁波效果最好，約可降低 0.88dB，當耗損性材質加

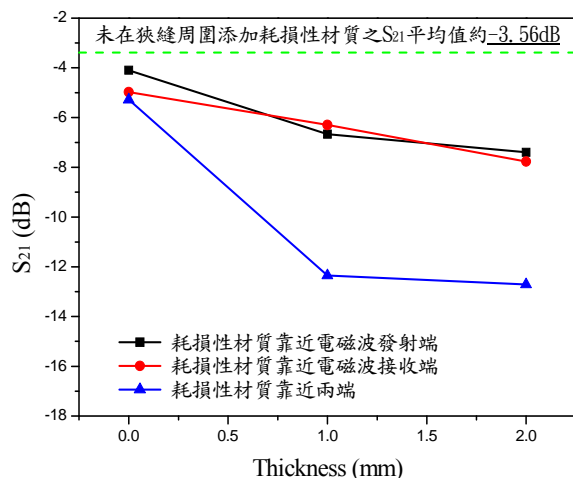


圖 16. 耗損性材質厚度大小 S21 比較圖 (900MHz)。

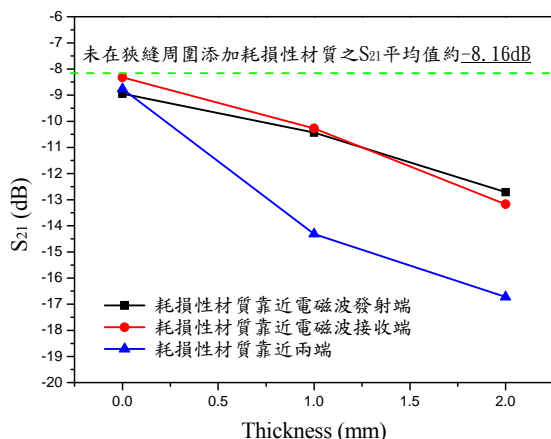


圖 17. 耗損性材質厚度大小 S21 比較圖 (1800MHz)。

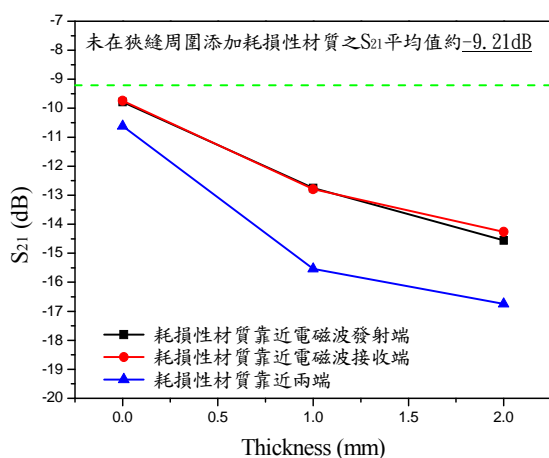


圖 18. 耗損性材質厚度大小 S21 比較圖 (2.4GHz)。

由以上模擬結果，我們可以得知在狹縫周圍添加耗損性材質可有效抑制電磁波洩漏問題，其中，在耗損性材質選擇方面，介電係數並不會影響抑制電磁波洩漏之效果；導電率越高，抑制電磁波洩漏效果會變差；狹縫四周添加耗損性材質面積大小對電磁波洩漏有影響但較不明顯，狹縫兩端皆添加耗損性材質對電磁波洩漏之影響較顯著，唯其成本也較高；其中，耗損性材質厚度對抑制電磁波洩漏的影響是所有模擬參數裡面最明顯的。

## 五、結論

我們經由鋁金屬導板的電腦模擬與實驗的分析比較，發覺我們探討的方法將建立在電磁理論中導波管及傳輸線的基本理論，透過理論的應用，抑制電磁波洩漏情況。並藉由理論模擬輔以研究分析，在 GSM(900MHz、1800MHz)及無線區域網路(2.4GHz)頻段得到相關結論可知，增加狹縫之有效厚度及在狹縫周圍添加耗損性材質，均能有效降低電磁波穿透狹縫之能量。未來我們依據實際電磁波防護需求，並將以透過實際之量測，提供適當之方法，以避免電磁波穿透狹縫，藉以全面提升屏蔽體之防護效能，並將各部分之電磁波防護結果運用於屏蔽體整體架構上，並進行相關實務驗證。本文所建議及獲得之防護方法及相關設計參數，可提供電磁屏蔽體之狹縫洩漏防治參考。

## 參考文獻

- [1] Erbas, C., and Kent, S., "Shielding Effectiveness of a Rectangular Cavity with Aperture between 1-3 GHz," IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Istanbul, Turkey, vol. 1, pp. 343-346, May, 2003.
- [2] Gu, C., and Li, S., "Shielding Effectiveness of An Enclosure with Apertures," IEEE International Symposium on Microwave Antenna Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications, Beijing, China, vol.1, pp. 614-618, August, 2005.
- [3] Po'ad, F. A., Jenu, M. Z. M., Christopoulos, C., Thomas, D. W. P., Abdullah, W. R.,



- Yusoff, K., and Shariff, B. M., "Shielding Effectiveness of Rectangular Metallic Enclosures with Apertures," Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics, Malaysia, pp. 167-171, December, 2005.
- [4] Kraft, C., "Modeling Leakage Through Finite Apertures with TLM," IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Naperville, IL, USA, pp. 73-76, August, 1994.
- [5] Fan, Y., Du, Z., Gong, K., and Li, G., "Analysis on Shielding Effectiveness of Metallic Enclosures with Slot," Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics, Hangzhou, China, pp. 43-45, November, 2003.
- [6] Chatterton, P. A., and Houlden, M. A., Electromagnetic Theory to Practical Design, John Wiley & Sons, New York, pp. 145-155, 1991.
- [7] Medveczky, G. G., and Dickten, T., "High Quality Shielding with Predictable and Verifiable Effectiveness," IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, California, USA, vol.2, pp. 565-570, August, 1999.
- [8] Rakshit, B. M., "Radio Frequency Shielding with Aluminium Honeycomb," IEEE International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility, Bangalore, India, pp. 413-415, December, 1995.
- [9] Bitzer, T., "Honeycomb Technology-Design, Manufacturing Applications and Testing," Chapman & Hall, London, pp. 142-143, 1997.
- [10] Lin, L., and Ramahi, O. M., "Analysis and Reduction of Electromagnetic Field Leakage through Loaded Apertures," IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Maryland, USA, vol.2, pp. 942-945, May, 2003.
- [11] LI, B., LI, L., and LIANG, C. H., "Waveguide Slot Array Antenna with EBG High-impedance Surface Structure," IEEE National Key Laboratory of Antennas and Microwave Technology, Xidian Univ., Xi'an, 710071, APMC2005 Proceedings, 2005.
- [12] Yablonovitch, E., "Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics," Phys. Rev. Lett., 58(20) , pp. 2059-2062, 1987.
- [13] Sievenpiper, D., "High impedance electromagnetic surface with forbidden frequency band," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques , 47(11) , pp. 2059-2074, 1999.
- [14] Li, Z., and Y, R. S., "PBG, PMC and PEC surface for antenna applications: A comparative study," IEEE AP-S Dig, pp. 674-677, July, 2000.
- [15] Collin, R., "Field Theory of Guided Waves," 2nd ed. New York: IEEE Press, 1991.
- [16] Zhang, G. H., Fu, Y. Q., Zhu, C., Yan, D. B., and Yuan, N. C., "A Circular Waveguide Antenna Using High-Impedance Ground Plane," IEEE Antennas and Wireless Procreation Letters, vol. 2, pp. 86-89, 2003.
- [17] Sievenpiper, D., "et al. Antennas on high-impedance ground planes," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques's Digest pp. 1245-1248, 1999.
- [18] LI, L., ZHANG, Y., and LIANG, C. H., "A Locally Conformal ftd Analysis of Coupling Properties of A Doublet Slot Antenna in Rectangular waveguide," Chinese Journal of Electronic 12(3), July, 2003.
- [19] 林嘉彝, 電磁脈衝屏蔽開口效應研究, 碩士論文, 元智大學, 桃園, 第 16-18 頁, 2002。
- [20] Henry, W. O., Noise Reduction Techniques in Electronic Systems, John Wiley & Sons, New York, pp. 159-177, 1988.

蘇文寬等

金屬狹縫在 GSM 和 WLAN 通訊頻帶的電磁阻隔特性研究