

## 鍍鎳碳纖維對電磁波屏蔽效能之探討

# A Study of the Shielding effectiveness of Nickel-plated Carbon Fiber Against the Electromagnetic Wave

孫長春 高振育 許主霖 蘇惟隆

Chang Chun Sun, Jenn Yu Kau, Chu Lin Hsu, Wei Long Su

黎明技術學院 數位多媒體系

Department of Digital Multimedia Technology, Lee-Ming Institute of Technology

### 摘 要

本文是探討以高導電的鍍鎳碳纖維作為添加物之複合材料對電磁波屏蔽效能之影響。該片狀之複合材料，是以熱可塑性聚胺酯(polyurethane, PU)為膠合劑(Binder)，再以特定製程製作出 20x20 cm<sup>2</sup> 之不同厚度及不同鍍鎳碳纖維含量的片狀成品。接著將該片狀成品分別採用 ASTM D4935 規範之同軸測試法及 IEEE-299 規範之自由空間測試法，來量測高導電鍍鎳碳纖維複合材料對電磁波之屏蔽效能，二種方法的測試頻譜範圍不同。同軸測試法之頻譜範圍是 30 MHz~1.5 GHz，自由空間測試法之頻譜範圍是 10 KHz~1.5 GHz。經由屏蔽效能的測定，添加 21 克之高導電的鍍鎳碳纖維配方，其屏蔽效能均能大於 80dB 以上，亦能符合 IEEE-299 規範之：實測值  $\geq$  SEM  $\approx$  20 log f - 60 的規格。

**關鍵詞：**鍍鎳碳纖維、電磁波、屏蔽效能、聚胺酯

### Abstract

This paper is to discuss the influence of the high electrical conductivity nickel-plated carbon fiber on the shielding performance against the electromagnetic wave. The nickel-plated carbon fiber is used as an additive into the thermoplastic polyurethane as the binder to make the composite material. The sheets of composite material are made at the size of 20x20 cm<sup>2</sup> of different thickness and various content of nickel-plated carbon fiber. The composite material sheets will be tested by two test methods respectively to measure their shielding effectiveness against the electromagnetic wave: the coaxial test method with the ASTM D4935 specification, and the free-space test method with the IEEE-299 specification. The test spectrum of the coaxial test method ranges from 30 MHz to 1.5 GHz, while that of the free-space test method ranges from 10 KHz to 1.5 GHz. The test



results show that the shielding effectiveness is greater than 80dB when the composite material is made with 21 grams nickel-plated carbon fiber. This 21 grams nickel-plated carbon fiber formula also meets the IEEE-299 specification: measured value  $\geq SEM \mp 20 \log f - 60$ .

**Key Words:** nickel-plated carbon fiber, electromagnetic wave, shielding effectiveness, polyurethane



## 1. 前言

電路或電子與電器系統中，除了正常訊號之外，亦伴隨著雜訊之電磁訊號，造成雜訊的原因大致可歸納成四類，一為系統雜訊，此乃系統本身元件不規則的變動所造成；二為環境雜訊，是由系統週邊之電子與電器設備所產生者，如馬達、開關裝置、無線電發射機等；第三類是指自然界的變化所造成者，如閃電、太陽風暴等；第四類則是人類蓄意製造之高能量電磁波，此種瞬間巨大之電磁波能量，會造成系統中電子零組件的損毀，藉以破壞電子電路系統，如小型核彈爆炸、電磁脈衝(Electro-magnetic pulse, EMP)武器等。上述之電磁干擾，通常是藉由傳導或輻射的方法進入元件、電路或電子與電器系統中，因此，如何提升電子系統對高能量電磁波之屏蔽效能，將此干擾的電磁波屏蔽於元件、電路或系統之外，以降低及避免系統的失效或損毀，繼續維持電子系統正常之運作就變成極需解決之課題。

所謂電磁波屏蔽(Electromagnetic shielding)；就是將有屏蔽效能之屏蔽物件，放置於電磁波干擾源與欲防護之電子系統間，以防止電磁波任意散佈的效果。因此，可將金屬物環繞雜訊產生物，以消除或減少電磁能量的外洩而干擾其他電子系統，如圖 1 所示；或者是將金屬物環繞於較易受雜訊干擾之感受性高的電子裝備或系統外，以防外界電磁能量的干擾而影響系統的正常運作，如圖 2 所示。提供電磁波屏蔽用的金屬種類、厚度、形狀等，均須視電磁場的特性以及不同需求而予以訂定，否則將影響其屏蔽效能。通常屏蔽效能(Shielding Effectiveness, SE)是以電、

磁能量被削減的多寡而定，它與許多變數有關，包括：金屬的型式、金屬的性質、厚度、距離、頻率等，屏蔽效能是以分貝(dB)表示之。

本報告是研製以高導電的鍍鎳碳纖維作為添加物之複合材料，以熱可塑性聚胺酯(polyurethane, PU)為膠合劑(Binder)，再以特定之製程製作出 20x20 cm<sup>2</sup> 之不同厚度及不同鍍鎳碳纖維含量的片狀成品。接者將該片狀成品分別採用 ASTM D4935 規範之同軸測試法及 IEEE-299 規範之自由空間測試法，來量測其對電磁波之屏蔽效能，二種方法的測試頻譜範圍不同，同軸測試法之頻譜範圍是 30 MHz~1.5 GHz，自由空間測試法之頻譜範圍是 10 KHz~1.5 GHz，經由屏蔽效能的測定，以確認該複合材料之屏蔽效能大於 80dB 以上。以下僅就輻射干擾之能量場的理論做一簡單敘述。

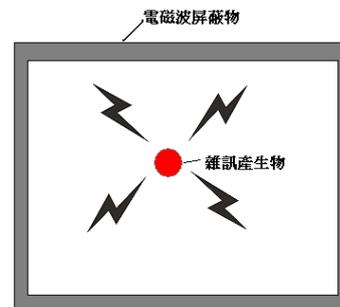


圖 1. 電磁波屏蔽物隔離內部雜訊源對外界之影響示意圖

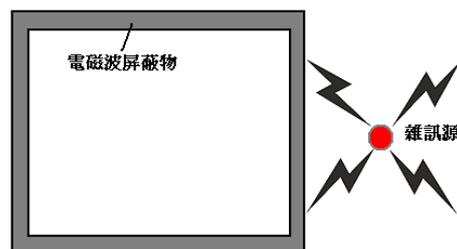


圖 2. 電磁波屏蔽物隔離外界雜訊源對內之影響示意圖



## 2. 電磁波屏蔽

輻射式干擾一般有三種基本的干擾模式：第一類為電容性(電場)干擾，此類干擾起因於電路間電場之相互作用；第二類為電感性(電磁)干擾，此類干擾起因於兩電路間磁場之相互作用；第三類則為電場與磁場的混合干擾。電磁波之干擾常決定於感受體與雜訊產生物之間的距離，若兩者相距很近(稱之為近場或感應場)，則電場與磁場的干擾須分別考量；若兩者相去甚遠(稱之為遠場或輻射場)，則電場與磁場應一併考量。通常是以波阻抗(Wave Impedance)來衡量，所謂波阻抗實為電場與磁場的比值，即  $Z_w = E/H$ ，單位是歐姆。若於遠場或輻射場中，波阻抗等於媒體之特性阻抗，以空氣言為 377 歐姆。若在感應場或近場中，則波阻抗決定於雜訊產生物本身特性與兩者間距離，趨若其波阻抗值小於 377，即雜訊產生物為高電流低電壓者，如環形天線，則在感應場中呈磁性，當兩者距離逐漸增加時，則磁場強度值隨其間距離之立方倒數衰減，但是與磁場相依而生之電場則與距離的平方成反比，即：

$$H \propto \frac{1}{r^3}, \quad E \propto \frac{1}{r^2} \quad (1)$$

反之，若雜訊產生物為高電壓低電流者，如繩形或桿形天線，波阻抗大於 377，則在感應場中呈電性，則電場之強度與距離之立方成反比，磁場則與距離平方成反比，即：

$$H \propto \frac{1}{r^2}, \quad E \propto \frac{1}{r^3} \quad (2)$$

當雜訊產生物與感受體之間的距離超過  $\lambda/2\pi$  ( $\lambda$  是雜訊波長)時，則無論是磁場或電性感應場其衰減均與距離的倒數(1/r)成正比。此處之所以強調波阻抗，即電場與

磁場之比值，是要依據此特性來選擇屏蔽材料。圖 3 說明電磁場強度與雜訊原型式及距離間之關係；圖 4 顯示波阻抗為距離函數的關係。

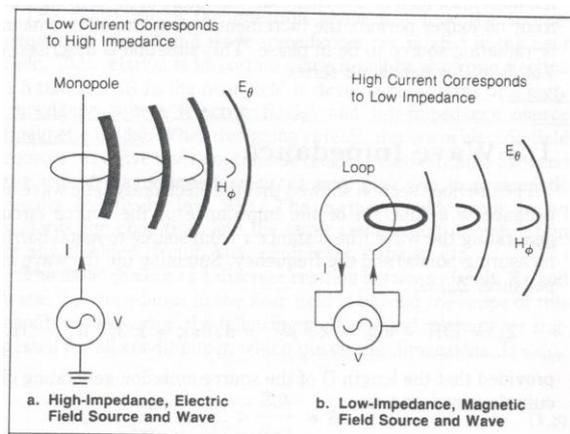


圖 3 電磁場強度與雜訊原型式及距離間之關係圖<sup>(2)</sup>

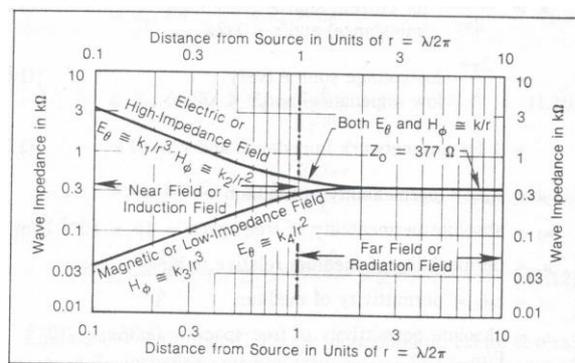


圖 4 波阻抗與距離之函數關係圖<sup>(2)</sup>

屏蔽材料之屏蔽效能，一般是指電磁波經過屏蔽物時能量被衰減的量，通常是以分貝(dB)表示，其定義如(3)式所示：

$$SE_{dB} = 10 \log \left( \frac{\text{incident power density}}{\text{transmitted power density}} \right) \quad (3)$$

方程式中之能量(powder,  $W/m^2$ )=電場(E, V/m) x 磁場(H, A/m)，故上式是可寫成(4)式：

$$SE_{dB} = 10 \log \left( \frac{E_b H_b}{E_a H_a} \right) \quad (4)$$



式中  $E_b, H_b$  = 屏蔽前(before)之電場與磁場之值,  $E_a, H_a$  = 屏蔽後(after)之電場與磁場之值。若屏蔽前後之波阻抗均相同, 則  $H_b = E_b/Z_w$ 、 $H_a = E_a/Z_w$ , 帶入(4)式中, 可得近場中電場與磁場的屏蔽效能如下:

$$SE_{dB} = 20 \log\left(\frac{E_b}{E_a}\right) \quad (5)$$

$$SE_{dB} = 20 \log\left(\frac{H_b}{H_a}\right) \quad (6)$$

當電磁波穿過任一屏蔽材料時, 通常會有兩種類型的能量損失, 一為吸收損失(Absorption Loss, A), 另一為反射損失(Reflection Loss, R), 因此屏蔽效能亦可寫成下式:

$$SE_{dB} = A_{dB} + R_{dB} + B_{dB} \quad (7)$$

$$A_{dB} = 131.4t_{mm} \sqrt{f_{MHz} \mu_r \sigma_r} \text{ dB} \quad (8)$$

$$R_{dB} = 20 \log\left(\frac{Z_w}{4Z_s}\right) \quad (9)$$

$$B_{dB} = 20 \log\left|1 - \left[\frac{(K-1)^2}{(K+1)^2}\right] e^{-2\gamma t}\right| \quad (10)$$

式中  $B_{dB}$  為修正因子(Correction Factor), 通常在 A 大於 10 dB 及能量場為近場之電場與遠場等三種情況下可忽略不計;  $K=Z_w$ (波阻抗)/ $Z_s$ (屏蔽阻抗);  $\mu_r$  與  $\sigma_r$  分別為屏蔽材料相對於銅的導磁性與導電性;  $f$  為電磁波頻率;  $t$  為屏蔽物厚度;  $\gamma$  為傳播常數(propagation constant,  $= \alpha + j\beta$ )。反射損失與吸收損失均隨著電磁波的頻率、屏蔽材料種類(電阻係數、導磁係數、導電係數)、外形(角錐、蜂巢、平板)、厚薄等而定, 且反射損失會隨能量場與電磁波阻抗之不同而改變, 但是對吸收損失而言, 則無明顯差異。大多數屏蔽物之 SE 值在 20 dB~80 dB 之間, 亦有極優秀之屏

蔽物的 SE 值在 100 dB~120 dB 之間, 若 SE 值 < 20 dB 之屏蔽物則屬劣級品。

磁能量場的屏蔽效果多靠吸收損失, 屏蔽材料一般使用高導磁性物質, 但對阻抗高的電場而言, 一般則用高導電性材料作為屏蔽物。若屏蔽物採用磁性材料, 則其吸收損失會增加, 反射損失會減少; 然而, 材料之導磁性會隨頻率增加而降低, 並會依電磁場能量而變動, 而且高導磁性材料的施工會改變其本身之磁性。因此, 大多數磁性材料的規格提供最佳之導磁性, 亦即在最適當的頻率與能量之情況下的導磁性。由於高能量的電磁場能夠飽和材料, 而使得其導磁性變低, 故常用多層次之磁性屏蔽來克服。第一層常用低導磁性材料, 第二層則用高導磁性材料, 且第一層永遠置於最近於能量產生者之處。總之, 導磁性材料(如鋼等)其在低頻時具較佳之磁廠屏蔽效能; 但在高頻時, 則導電性高的材料(如鋁、銅等)則具較佳之效果, 且屏蔽物的整體性之完整與否亦決定屏蔽效能。

### 3. 實驗與量測部分

#### 3.1 實驗部分

高導電鍍鎳碳纖維電磁波屏蔽膠片的製作程序可分為三步驟: 步驟 1 為 PU 溶膠製作、步驟 2 為預浸片製作、步驟 3 為電磁波屏蔽片成品製作, 製作流程如圖 5 所示。首先將 15 克之熱可塑性 PU 膠容於 85 克的甲苯溶劑中, 製作出液態之 PU 溶膠, 然後再將適量之日本東邦公司生產的高導電性鍍鎳碳纖維(表面電阻為  $75 \times 10^{-5} \sim 1.5 \times 10^{-3} \Omega/\text{cm}^2$ )加至 PU 溶膠中, 在抽真空操作下混合均勻, 並將甲苯溶劑完全抽離, 製作出電磁波屏蔽預浸片; 最後, 再將預浸片於 170°C 條件下熱壓成



20x20 cm<sup>2</sup>，厚度為 0.1~0.2cm 之電磁波屏蔽膠片，再進行電磁波屏蔽性能的測試。本文之電磁波屏蔽膠片配方分為 2 種厚度(0.1 與 0.2cm)及 2 種鍍鎳碳纖維含量(12 與 21 克)，共計 4 種膠片配方，如表 1 所示。

### 3.2 屏蔽效能量測

在本研究中，對電磁波屏蔽效能之測定，分別採用 ASTM D4935 規範之同軸測試法(如圖 6 所示)及 IEEE-299 規範之自由空間 (Free Space) 測試法(如圖 7 所示)，以確認鍍鎳碳纖維複合材料在不同條件下之屏蔽效能值。

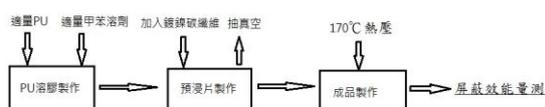


圖 5 高導電鍍鎳碳纖維電磁波屏蔽膠片製作程序

表 1、電磁波屏蔽膠片配方

膠片編號	A1	A2	B1	B2
膠片厚度(cm)	0.1	0.1	0.2	0.2
鍍鎳碳纖維含量(克)	12	21	12	21

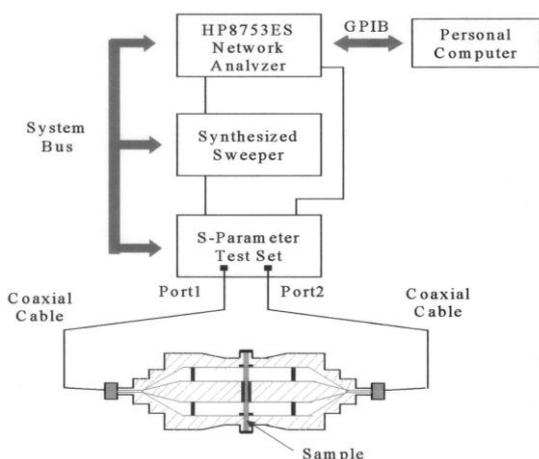


圖 6 同軸測試法系統示意圖

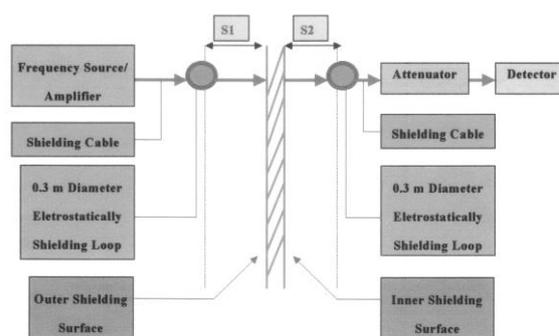


圖 7 自由空間測試法示意圖

同軸測試法是採用 HP 公司之 8753ES 設備，將試片置於密閉的不銹鋼容器中，利用網路向量分析儀 (Vector Network Analyzer, VNA) 量測在不同頻率下的功率反射係數 (reflected coefficient) 與穿透係數 (transmitted coefficient) 來分析鍍鎳碳纖維複合材料之屏蔽效能；自由空間測試法則是將待測試片至於電子暗房中，該電子暗房內部四周均貼滿吸收電磁波之角錐形泡綿吸收體 (Absorber)，用來吸收散射之電磁波雜訊，以避免影響測試之正確性，暗房外部則以金屬層來遮蔽外來的電磁波雜訊，以便提供自由空間的測試環境。上述兩種方法的測試頻譜範圍不同，同軸測試法之頻譜範圍是 30 MHz~1.5 GHz，自由空間測試法之頻譜範圍是 10 KHz~1.5 GHz，經由屏蔽效能的測定，以確認該複合材料之屏蔽效能大於 80dB 以上。

### 4. 結果與討論

依據方程式(7)得知，當電磁波穿過任一屏蔽材料時，通常會有兩種類型的能量損失，一為吸收損失 (Absorption Loss, A)，另一為反射損失 (Reflection Loss, R)，吸收損失主要與材料的導磁性 ( $\mu_r$ )、導電性 ( $\sigma_r$ )、電磁波頻率 (f)、為屏蔽物厚度 (t) 有關



(如式(8)所示)，反射損失則與屏蔽材料之阻抗( $Z_s$ )有關，之間成反比關係(如式(9)所示)；在本研究使用的配方中，高導電鍍鎳層主要是造成電磁波的反射損失，碳纖維主要則是造成吸收損失，且由於膠片厚度及鍍鎳碳纖維的排列方式不同，會造成不同電磁波的多次吸收損失與反射損失。

圖 8 與圖 9 之配方是添加 12 克高導電鍍鎳碳纖維，厚度分別為 0.1 與 0.2 cm；圖 10 與圖 11 之配方則是添加 21 克高導電鍍鎳碳纖維，厚度亦分別為 0.1 與 0.2 cm。由圖 8、圖 9 與圖 10、圖 11 結果顯示，在相同之高導電鍍鎳碳纖維添加量下，較厚之電磁波屏蔽片，在低頻之屏蔽效能比薄屏蔽片性能佳，在 30 MHz 時，A1 配方(圖 8)之屏蔽效能約為 33dB，B1 配方(圖 9)之屏蔽效能則約為 45dB，A2 配方(圖 10)之屏蔽效能約為 57dB，B2 配方(圖 11)之屏蔽效能約為 72dB；另由圖 8 與圖 9 在高頻(1.0 GHz)之結果顯示，A1 配方屏蔽效能

為 63.833dB，B1 配方則為 81.793dB，其原因可能為在較少之高導電鍍鎳碳纖維添加量下，當屏蔽片厚度增加時，電磁波在材料內部之傳遞過程中，造成多次吸收損失與反射損失的影響較為顯著，且由(8)式得知，屏蔽片厚度( $t$ )與吸收損失( $A_{dB}$ )成正比，因此，B1 配方之整體屏蔽效能(30 MHz ~ 1.5 GHz)均優於 A1 配方。但由圖 10 與圖 11 之結果顯示，當高導電鍍鎳碳纖維加至 21 克時，屏蔽片厚度對屏蔽效能的影響程度大幅降低，僅有在極低頻(30 MHz)附近有影響，在其他電磁波頻譜下對屏蔽效能之影響微乎其微，均能達到 80dB 以上。

圖 12 是 A2 配方利用 IEEE-299 測試法之電磁波屏蔽效能頻譜圖，由結果顯示，添加 21 克高導電鍍鎳碳纖維之配方，其屏蔽效能均能滿足 IEEE-299 測試規範之要求(方程式(11))。

$$\text{實測值} \geq SE_M \cong 20 \log f - 60 \quad (11)$$

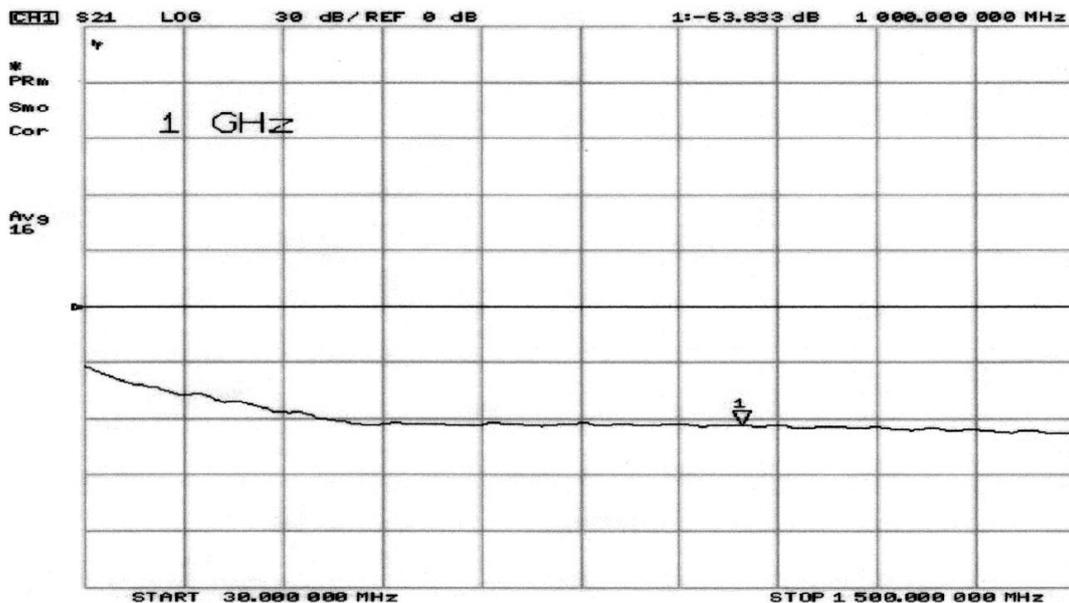


圖 8. A1 配方電磁波屏蔽效能頻譜圖(30MHz~1.5GHz)



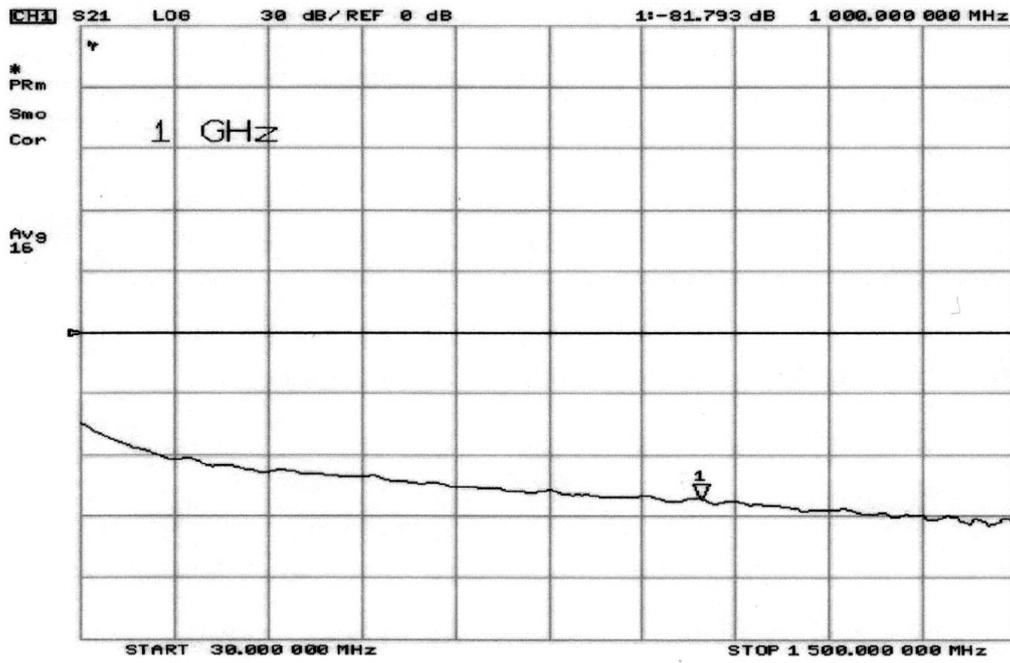


圖 9. B1 配方電磁波屏蔽效能頻譜圖(30MHz~1.5GHz)

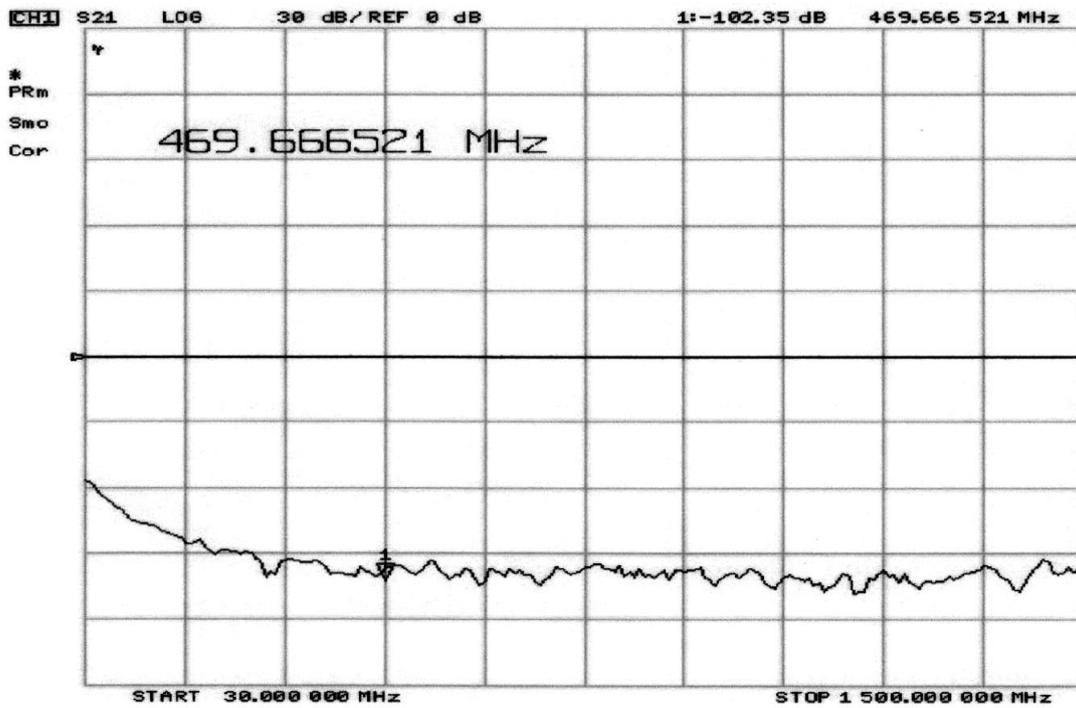


圖 10. A2 配方電磁波屏蔽效能頻譜圖(30MHz~1.5GHz)





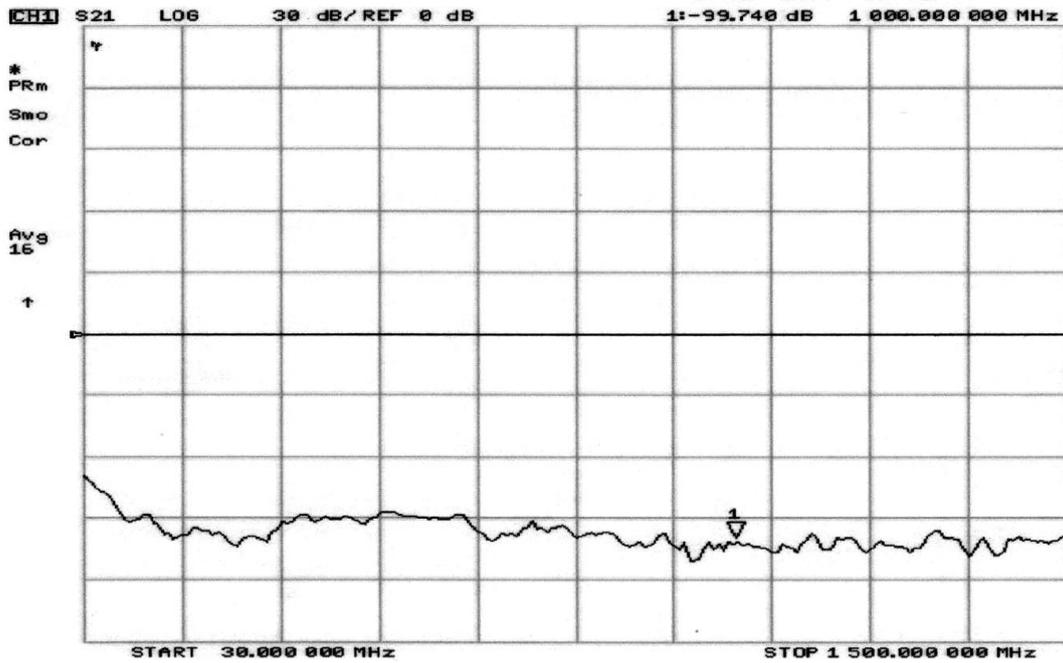


圖 11. B2 配方電磁波屏蔽效能頻譜圖(30MHz~1.5GHz)

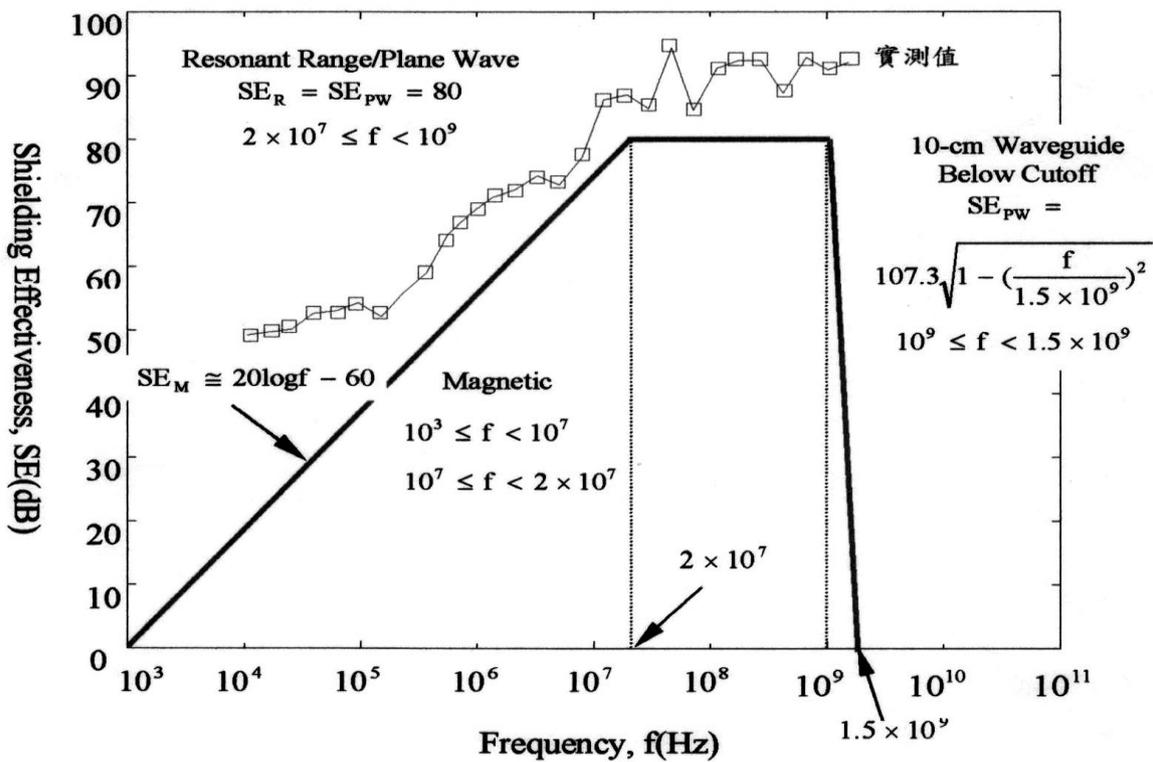


圖 12. A2 配方利用 IEEE-299 測試法之電磁波屏蔽效能頻譜圖(10kHz~1.5GHz)



## 5. 結論

添加高導電鍍鎳碳纖維於熱可塑性聚胺酯(polyurethane, PU)中，製作出之複合材料電磁波屏蔽片，除了屏蔽性能優異外，在終端使用時亦具有方便性，包括貼附、切割、彎曲等。由實驗結果顯示，電磁波屏蔽效能與屏蔽片之厚度及鍍鎳碳纖維含量有下列之關係：

1. 對低含量之鍍鎳碳纖維(加至 12 克時)屏蔽片而言，不論低頻獲高頻，較厚之屏蔽片的屏蔽效能均優於薄的屏蔽片。
2. 對高含量之鍍鎳碳纖維(加至 21 克時)屏蔽片而言，厚度對屏蔽效能的影響程度大幅降低，僅有在極低頻(30 MHz)附近有影響，在其他電磁波頻譜下對屏蔽效能之影響微乎其微，均能達到 80dB 以上。
3. 在相同之導電鍍鎳碳纖維添加量下，較厚之電磁波屏蔽片，在低頻之屏蔽效能比薄屏蔽片性能佳。

## 參考文獻

1. E. F. Knott, J. F. Shaeffer, and M. T. Tuley, *Radar Cross Section*, 2<sup>nd</sup> Edition, ISBN 0-89006-618-3, Artech House, Lnc., 1993.
2. D. R. J. White and M. Mardiguian, *Electromagnetic Shielding*, ISBN 0-944916-03-01, Interference Control Technologies, Inc., 1988.
3. 劉錚達、韓錦鈴、謝國煌，”Study of Electromagnetic Interference Shielding on Polyaniline/Resin Copolymer “, Proceedings of 2007 Annual Polymer Conference , 中華民國。
4. Yong Li, Changxin Chen, Jiang-Tao Li, Song Zhang, Yuwei Ni, Seng Cai, and Jie Huang, “Enhanced Dielectric Constant for Efficient Electromagnetic Shielding Based on Carbon-Nanotube-Added Styrene Acrylic Emulsion Based Composite”, *Nanoscale Res Lett.* 2010 July; 5(7): 1170–1176.
5. T. Inui, K. Koniski, and K. Oda, “Fabrications of Broad-Band RF-Absorber Composed of Planar Hexagonal Ferrites,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 35(5), pp. 3148-3150, 1999.
6. B. T. Lee and H. C. Kim, “Prediction of Electromagnetic Properties of MnZn Ferrite-Silicone Rubber Composites in Wide Frequency Range,” *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 35(6A), pp. 3401-3406, 1996.
7. S. Sugimoto, S. Kondo, K. Okayama, H. Nakamura, D. Book, T. Kagotani, M. Homma, H. Ota, M. Kimura, and R. Sato, “M-Type Ferrite Composite as a Microwave Absorber with Wide Bandwidth in the GHz Range,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 35(5), pp. 3154-3156, 1999.
8. 余寄仲、柯文淞，”電磁波吸收及屏蔽材料介紹”，工業材料雜誌，178 期，pp.107-149，2001。
9. X. Shui and D. D. L. Chung, “Submicro Nickel Filaments Made by Electroplating Carbon Filaments as a New Filler Material for Electromagnetic Interference Shielding,” *J. of Electronic Materials*, vol. 24(2), pp. 107-113, 1995

