

無線通訊之電磁干擾 影響與防制對策

◆王宗雄

工研院工業材料研究所

研究員

摘要

近年來，由於電腦、通信與資訊技術的不斷改進，拉近了人類間彼此的距離。然而，隨著高速化與密度化的需求和高頻域的大量運用，也導致信號傳輸的品質受到存在於電路中之雜訊與電磁干擾的影響程度，有日益複雜及越加嚴重的跡象。因此該採取何種的因應對策，考驗著電路設計者的智慧。本文針對無線通訊之電磁干擾的運作途徑、影響之機制程度，以及因應的防制對策和方法等，做概論性的扼要說明，期對電磁干擾防制之設計有所助益。

關鍵詞

無線通訊(Wireless Communication)；電磁干擾(Electromagnetic Interference; EMI)；跳頻(Frequency Hopping)

前言

無線電是二十世紀發展最迅速、應用最廣泛的科技之一，在今天無論科學、文化、經濟、貿易，以及軍事國防等，均能見到其無線電的身影與貢獻之處。人們由於無線通訊科技的躍進而突破有線傳輸空間之限制，進而享受前所未有的便利、快感與樂趣，且更欣喜其所帶來的無限商機，致使民間通訊業者

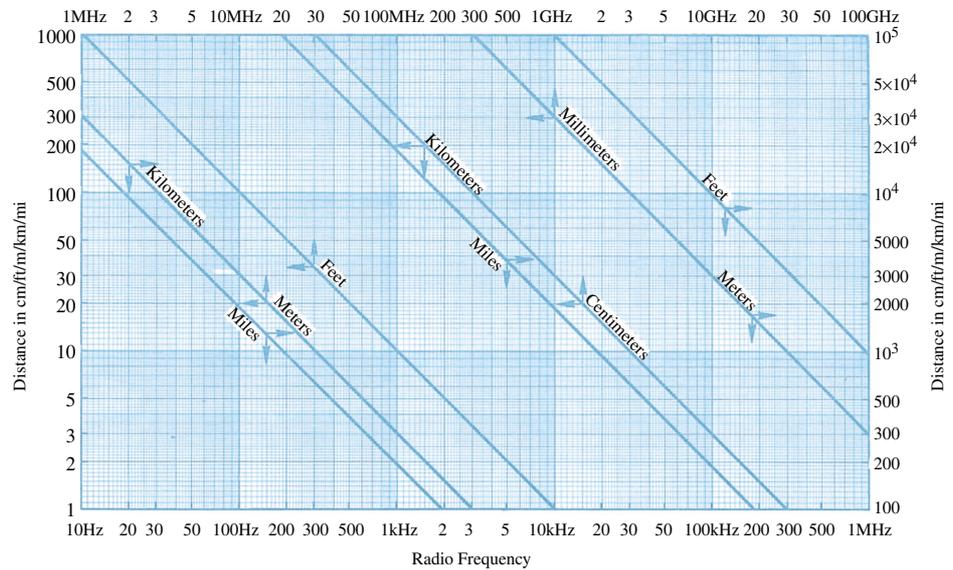
競相朝向運用高頻電磁波（指射頻及微波頻段）的通訊範疇發展，諸如個人數位助理(PDA)、行動電話、無線電話機/對講機、網際網路(Internet)、調頻與調幅接收器、視訊傳送與接收器、通訊衛星導航系統、雷達通訊系統、藍芽(Blue Tooth)系統等；不過這些人工產品會產生對應的輻射或可能洩漏相當的電磁波，再加上既存在的廣播、電視台、警用通訊器材及未來擬開放的地區性電台，已

使得我們的生存空間充滿著各種電磁波，導致外部環境的電磁波污染，而且在許多電子產品中，其元件和元件間的關係、系統與系統間的關係、高波的影響、元件和接地間的雜散電容與電感、電路間的互感互連，以及電路的迴路輻射等所造成的內部電磁波污染，這些均對通訊的品質有負面的影響。為適當保護無線電通信及商品免受電磁波污染及干擾，且限制商品本身產生電磁波污

染與干擾，各國均制定商品電磁相容的管理辦法，以及電磁干擾的標準規範，對通訊產品的品質要求也日益嚴苛。因此電磁干擾控制之設計將越加重要，而相關的電磁干擾消除技術更需產官研學界積極投入予以研發與應用，否則將會直接影響國內數百億美元產值的通訊產業未來之發展。

無線通訊電磁波與通信傳播需求

電波的效能在傳遞電能，凡是具有能放射的電能都可藉由不需導線傳輸之無線電波的方式傳播至空間中，其傳播速度相當於光速；頻率與波長的轉換關係可以方程式(1)做計算，其中 λ 為波長， f 為頻率，而 C 則為光速（在空氣中約等於 3×10^8 m/sec），圖一為無線電波在空氣中波長與頻率的數值轉換對照圖。頻率在3000GHz以下的電波即屬於無線電波，其只佔整個電磁波頻譜的一部分；就頻率而言，無線電波的低端與音頻相當，其高端與紅外線相接。



▲圖一 無線電波在空氣中波長與頻率數值轉換對照圖^[3]

$$\lambda f = C; \lambda = \frac{C}{f} \text{ or } f = \frac{C}{\lambda} \quad (1)$$

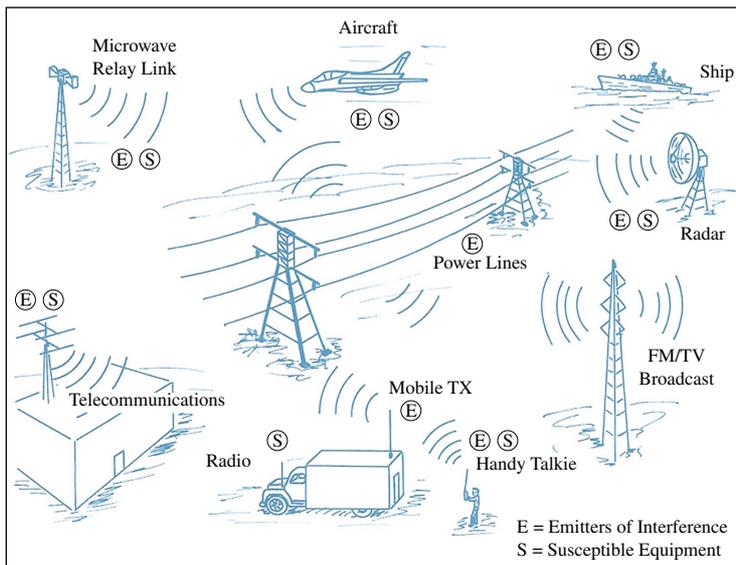
國際電信協會於1959年針對無線電區段的劃分訂定一個標準（如表一所列），以便於管制。通常頻率在200MHz以上即進入屬於微波的部分，亦是超高頻率的開始。無線電波因傳送的頻率不同，其採行的傳播方式也不一樣，主要的傳播方式有地表波傳播、天波傳播、視距傳播及散射傳播四種。無線電波在介質或具介質分界面的環境中，會產生折射、反射、散射、繞射即被吸收等現象，因此會受到發射頻率、傳播距離、地形地物、季節氣候與時間環境等因素的影響；一般而言，發射的無線電波之電場強度中值必須遠大於接收器的接收電位臨界值，方能具有通暢無阻的效能，而電場強度中值電位(E_0)與接收器之接收電位(E_1)間的差值，即所謂的衰減深度，如方程式(2)以dB表示。行動電信系統中，衰減深度可達20~30dB。

$$\text{衰減強度(dB)} = 20 \log E_1 / E_0 \quad (2)$$

表一 無線電頻率區段與波長區段之劃分^[5]

段號	頻段名稱	頻率範圍 (含上限, 不含下限)	波段名稱	波長範圍 (含下限, 不含上限)
1	至低頻	3~30赫(Hz)	至極長波	100~10兆米
2	極少低頻	30~300赫(Hz)	極長波	10~1兆米
3	超低頻	300~3000赫(Hz)	超長波	100~10萬米
4	特低頻(VLF)	3~30千赫(KHz)	特長波	10~1萬米
5	低頻(LF)	30~300千赫(KHz)	長波	10~1千米
6	中頻(MF)	300~3000千赫(KHz)	中波	10~1百米
7	高頻(HF)	3~30兆赫(MHz)	短波	100~10米
8	特高頻(VHF)	30~300兆赫(MHz)	米波	10~1米
9	超高頻(UHF)	300~3000兆赫(MHz)	分米波	10~1分米
10	極高頻(SHF)	3~30吉赫(GHz)	釐米波	10~1釐米
11	至高頻(EHF)	30~300吉赫(GHz)	毫米波	10~1毫米
12	最高頻	300~3000吉赫(GHz)	絲米波	10~1絲米

註：段號指頻帶區段的編號，定義其區段頻率範圍從 0.3×10^n 至 3×10^n Hz（含最高值，但不包括最低值）



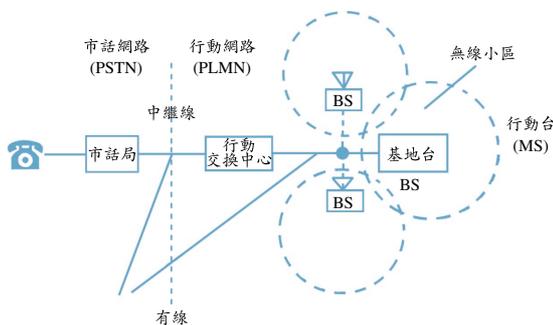
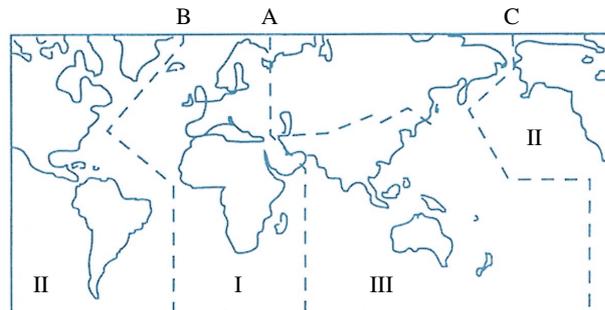
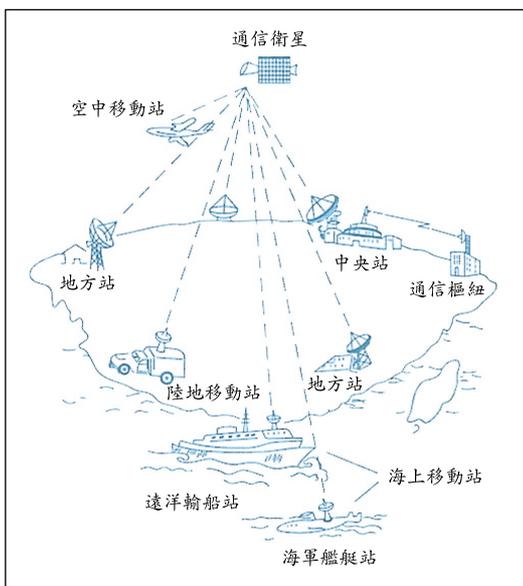
▲圖二 可能造成無線通訊電磁干擾現象的人工雜訊來源^[3]

由於無線電波內含有發射電波之能量，如遇到頻率區段相同或相似的接收器時即會被接收，因此在進入無線通訊電磁干擾之探討前，仍需對於訊號傳輸通信的系統架構與運用的頻波區段範圍等要有所瞭解，方能切入重點掌握關鍵，達到規避電磁干擾或降低受干擾影

響程度之防制目的。

圖二為可能造成無線通訊電磁干擾現象的人工雜訊來源，包括微波轉播、航空/船艇聯繫通信、電信通訊、雷達傳訊、電源線、無線通訊行動系統、手持話機及調頻/電視廣播等，其會受電磁干擾的相關產品包括為頻率放大模組、超高頻電視、無線傳真機、高頻電報、高頻電話機、無線擴音器、雷達航空管制器、氣象廣播器等。今僅就個人通

信、行動通信與衛星通信做比較分析說明，以便能瞭解我們在無線通訊科技下所處的空間環境，提供通訊資源運用與淨化之參考，並對無線電波之電磁干擾的防制，思索可著手處理或改善的因應對策與方針。1986年，國際無線電諮詢委員會(CCIR)為制定第三代行動通信國際標準，提出以個人全球通信為目標的「未來公眾陸地行動通信系統(FPLMTS)」，個人通信的概念方才成形，更促進通信從「服務到家庭」推向「服務到個人」的變革；尤其是蜂巢小區技術、無線電話及無線呼叫技術的快速發展，為用戶擺脫終端設備的束縛，達到個人通信之移動性。傳輸信息需要有一定的頻寬，稱做信息頻寬，例如人類語音之信息頻寬為300Hz~3400Hz，電視影像信息頻寬為數MHz。通常會使用相當的頻寬信號來傳輸信息，如此做法的傳輸效果最佳。

▲圖三 行動通信系統的組成^[5]▲圖五 全球無線電頻率劃分區域示意圖^[5]▲圖四 衛星通信示意圖^[5]

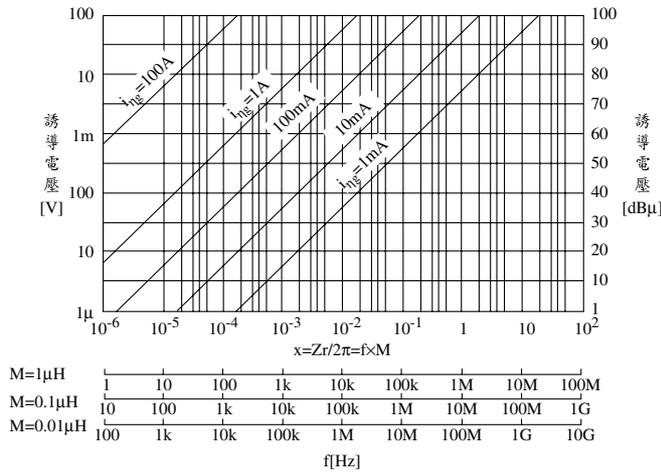
在無線通信中的射頻信號之頻寬與所傳送信息之頻寬是息息相關的，諸如使用調幅信號來傳送語音信息時，選用的頻寬是語音信息頻寬的兩倍；若此用調頻信號或脈衝編碼調變信號時，其頻寬亦僅為信息頻寬的幾倍至十幾倍間。然而如使用展頻通信時，其信號頻寬與信息頻寬之比則高達100~1000，其是利用展頻碼序列調變方式來展寬信號之頻譜，擴展的頻譜越寬，處理增益機能越好，抗電磁干擾性也越強。

我國行動電話於民國77年7月1日起正式開放，採用類比式行動電話系統

(AMPS)，目前因應需要亦有採用數位式行動電話標準規格之GSM系統。圖三為行動電信系統的組成，包括天線、饋線、基地台、行動台、手機台、控制器、交換機及電腦控制系統中心等，現階段使用的頻段僅限於30~1000MHz；要選擇適當而有效能的工作頻率，則需對發射功率、接收靈敏度、無線通道的傳播方式及運作的機制等方面要能有相當的認知與掌握，方不至徒勞無功。衛星通信因具有廣播特性，接收端點的建立亦相當容易，近年來許多國際性新聞和各類運動競賽均需依賴通信衛星予以傳播，圖四為衛星通信的示意圖。由於衛星通信是跨國界的，因此其工作頻率必須加以分配與控制，方不致產生相互干擾的現象；因此國際電信聯盟(ITU)依無線電有關規定將世界劃分成三個區域，如圖五所示，我國歸類在第III區域，而表二為衛星通信的頻段劃分。

無線電波電磁干擾的運作途徑及其影響

鑒於我們所處的空間環境到處充斥著無線電波，因此在進行無線通信系統產品的設計前，必須針對這些既存的無線電波之種類型態、干擾運作途徑、通

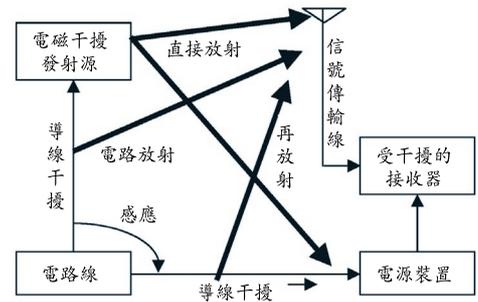


▲圖七 電磁干擾產生感應電壓的關係對照圖^[2]

信效能受影響程度等方面，做總體全方位的評估分析，納入干擾規避或減降的防制設計，以及通信效能增益或改善的全盤考量。電磁干擾發生在電磁波的發射源與接收器間，其干擾的運作途徑主要分為經由電路的導線干擾及透過空間的無線電放射干擾兩種，圖六為電磁干擾運作途徑的示意圖。通常有大電力的傳輸線與無線電商用頻率區段，均會引入不必要的信號而對系統造成干擾，為避免無線通信產品受到電磁波的干擾而影響其機制功能，對產品的品質要求均需符合電波法的規定，例如通信距離在100公尺以內，其容許的信號輸出電波強度需在15μV/m以下。圖七為電磁干擾而產生感應電壓的關係對照圖，說明了電磁感應電壓與電磁波干擾源之頻率與輸出功率有關。在行動通信中，由於行動台經常是處於動態情況而非靜止，所以基地台與行動台間的信號傳播與信息接收狀態，均會受到影響，且隨時隨地變化；因此通信區段間不能有明顯的分界線，需設計建構成一定的電場強度交疊區，以確保通信不會產生中斷的現象。這個電場強度交疊區的大小與地形地物

表二 衛星通信的頻段劃分^[5]

頻段	範圍(GHz)
UHF	0.3~1.12
L	1.12~2.6
S	2.6~3.95
C	3.95~8.2
X	8.2~12.4
Ku	12.4~18
K	18~26.5
Ka	26.5~40
毫米波	40~300

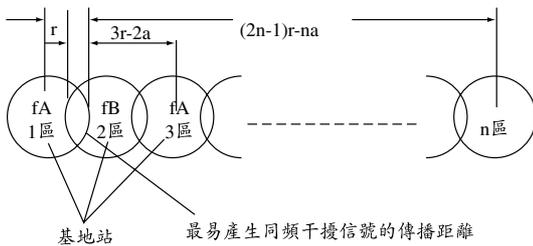
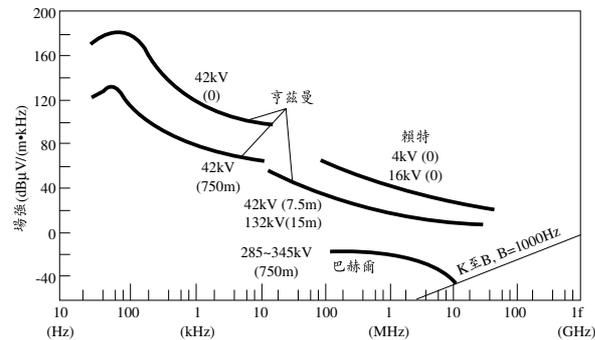


▲圖六 電磁干擾運作途徑示意圖

有關，通常交疊部分越大，不良的通信區域就越大；然而產生同頻干擾的程度也會越高，如圖八所示。圖中a為交疊距離，r為小區覆蓋半徑，因此從端點至產生同頻干擾的最近基地台之距離則為(3r-2a)；此外，同頻干擾信號I與有用信號S之比和其傳播距離的關係如方程式(3)所示：

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{S} &= \frac{r}{3r-2a} && \text{(雙全頻率方式)} \\ \frac{1}{S} &= \frac{r}{5r-3a} && \text{(三群頻率方式)} \\ \frac{1}{S} &= \frac{r}{(2n-1)r-na} && \text{(n群頻率方式)} \end{aligned} \right\} (3)$$

由方程式(3)可推知，交疊距離a越小時，則同頻信號的強度會越小，不過產生同頻干擾的現象也會較少。另外高壓輸電線對無線通信而言亦是一種強大的電磁

▲圖八 同頻干擾示意圖^[5]▲圖九 電力輸電線的電磁干擾頻譜^[6]

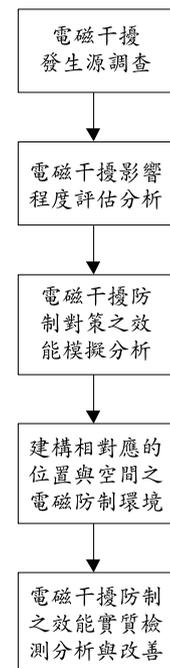
干擾源，其電力輸電線的輻射干擾測量值如圖九所示。

無線電波電磁干擾的防制策略與方法

針對無線電磁波干擾的防制，提出一個因應的對策流程，列示於圖十，包括電磁干擾發生源的調查、電磁干擾影響程度評估分析、電磁干擾防制對策之效能模擬分析、建構相對應的位置與空間之電磁防制環境、電磁干擾防制之效能實質檢測分析與改善等，使無線通信產品對電磁波之干擾程度能減降到最低。其中對於產品系統之性能要求、所處之電磁環境、傳播與耦合作用、電磁屏蔽機制與效能，以及通訊頻率和功率之管理與組配等，更需納入詳細之評估考量。現有系統電磁干擾防制的技術包括：1)將電路封閉在一個法拉第(Faraday)盒中，用以呈現出具電磁干擾屏蔽的機能；2)在電路板或系統的I/O埠上採用濾波和衰減技術，以達到電磁干擾防制的目的；3)運用電路的電場和磁場的屏蔽作用，或在電路板上採用適當的設計技術，精確而嚴格地控制電路板走線和電路板層之電容與電感，使系統對電磁干

擾的機制性能得以改善。根據上列之運用技術，電磁干擾的防制方法可從電路設計或電磁屏蔽等方面著手，不過前者僅能避免對外界產生電磁輻射干擾或外界引入的電磁傳導干擾，並無法阻擋外界電磁輻射干擾本身的電子元件運作，而且一般電路設計對200MHz以上工作頻率的電磁波干擾已很難予以消

除與減弱，其散發的高頻電磁波在機殼內會危及主機板，且介面功能穩定的問題仍然存在，並沒有解決。因此最直接有效的電磁波防制方法是利用電磁屏蔽處理，進行全部或區域之遮蔽處理，以完全阻隔本身散出或外界導入的電磁波，避免其干擾與影響。可運用一種所謂的「電波吸收體」黏貼於微處理器上



▲圖十 電磁干擾防制之對策流

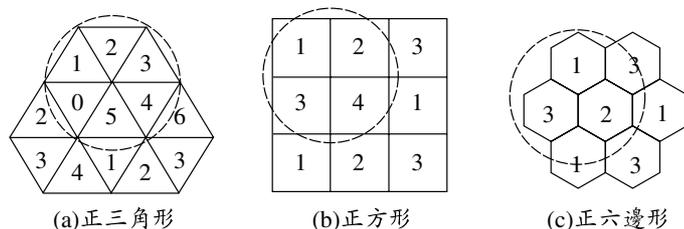
表三 各種電磁屏蔽金屬材料與其電磁屏蔽效果^[2]

斷面圖	電磁波的種類	低電阻磁場				高電阻電場				平面波		
		頻率 屏蔽導體	60 Hz	5 kHz	14 kHz	200 kHz	200 kHz	1 MHz	18 MHz	400 MHz	1 GHz	10 GHz
	鐵板(#24)	2.5	37	64	93	117	105	100	105	101	102	
	電解銅箔(1oz)	0	14	32	53	117	105	100	105	95	107	
	電解銅箔(3oz)	0	23	41	66	117	105	100	102	100	102	
	電解銅箔(7oz)	1.5	26	41	67	117	105	100	102	100	102	
	電解銅箔(3oz) 2層 (接觸)			44	88							
	電解銅箔(3oz) 2層 (分離3/4")	1	39	58	93		100		102	100		
	電解銅箔(3oz) 銲接接合	0.5	22	44	58		100		102	100	102	
	電解銅箔(3oz) 點溶接	0.5	23	41	65		100		96	92		
	電解銅箔(3oz) 插針接合	0.5	21	40	63		100		96	91		
	電解銅箔(3oz) 機械性接合	0.5	23	41	64		100		103	96		
	電解銅箔(3oz) 導電性環氧樹脂	0.5	17	30	56			100				
	電解銅箔(3oz) 非導電性環氧樹脂	0.5	15	27	50			100				

及殼內適當的位置，由於漫射頻率會因而產生位移，使因其之干擾而影響的功能穩定問題即可解決，且能減少電磁雜訊在3~5dB以上。具電磁屏蔽作用的材料應具有導電性或是導磁性，如鋅、鎳、鋁、銀、銅及鎂合金等金屬材料或是聚乙炔、聚苯胺與聚塞吩等具本質型導電高分子，均有極佳的作用效能，尤以金屬為最佳，表三為各種金屬材料與其屏蔽效果。

在無線通信的系統機制下，為了防制無線電波之同頻干擾，通常在鄰近的無線傳播小區內儘可能不使用相同的頻率，只在不同無線區群中，才運用相同

的無線頻率；如構成一無同頻干擾的面狀服務區，並考量運作之便利與成本觀念時，將會選擇具正六邊形的蜂巢式無線區群之通道架構，如圖十一所示，正三角形至少需要6個頻率通道組，正方形則需要4個頻率通道組，然而正六邊形僅需3個通道組即可涵蓋整個服務區，且無論是鄰接小區的中心間距及單位小區的有效面積均較大，以及交疊區域面積與交疊距離亦較小的機能作用下，產生同頻干擾最小，此即是蜂巢式網路架構的設計緣由。通常衛星通信的系統中會在其調變器前加裝擾碼器或去擾器，其作用是使進入調變器的信號頻譜產生擴



▲圖十一 面狀服務區所需最少無線頻率個數^[5]

散，用以防止衛星通信對其工作頻段相同的地面系統之微波線路造成干擾，同時也會減小因使用同一轉頻器而受其它調變載波的干擾程度。而於行動通信系統中選用的接收機必須具備抗干擾（電磁耐受）能力強、靈敏度高、選擇性佳及音頻失真小等特性，所謂的電磁耐受 (Electromagnetic Susceptibility, EMS)，是指當產物件處於電磁能量的環境中，其信號傳輸品質不受影響的允差範圍 (Tolerance)。此外對於高頻波信號之收發處理，最佳狀況是能在輸入與輸出的阻抗相匹配，因為如有微小的匹配偏差，均會導致信號在發收的信端反射，產生波形的變形失真，進而成為干擾的現象，應儘量避免。

又當雜訊的來源為時脈造成時，其能量通常會經由I/O電纜（包括對外的連接週邊線和對內的互連接線）而轉成高頻諧波輻射至空中，所以若能直接解決I/O電纜線的問題，相信大部分產品均能符合電磁干擾管制的相關規定。近年相當熱門的藍芽通訊體系中，對於電磁波干擾的防制策略是採用跳頻技術 (Frequency Hopping)，將2.4GHz的通信頻段切割成許多的通信頻道，使實體的通信頻道內的每個時槽上所傳送的資料，能不斷地從一個頻道跳躍到另一個頻道，當Master（主）與Slave（從）同樣

在 $f(2k)$ 頻道進行傳送與接收時，於下一個時槽，Master與Slave會依照彼此具相同的跳頻序列 (Hopping Sequence)，同時跳躍到另一個 $f(2k+1)$ 頻道進行傳送與接收。因此就算在 $f(2k)$ 頻道受到其他無線電磁波的干擾，在

$f(2k+1)$ 頻道亦不會受到干擾。

結論

近年來國內各界經過各種電磁干擾 (EMI)與電磁相容(EMC)研討會的宣導和自身經驗的體會，再加上國際對產品相關規格的要求，對電磁干擾所導致的問題之嚴重性，已有相當的瞭解與體認。但在相關的科技活動方面，則多半仍為各自為政，往往造成無謂的重複和競爭，而研究內容亦不夠週全，使其效能大打折扣，甚為可惜。

有鑑於此，要建構國內無線通訊電磁干擾之防制體系，除各通信產品製造業者自身應考慮電磁干擾的問題外，政府的決策機構也該有一套完整的規劃，以協調產、官、學、研各界，針對現行國內外無線通信法規與國際無線電頻段區分管理，並考量國家安全與國內有關通訊工程、國防科技、民航、民間電子消費產品、電視業界、醫療精密儀器和未來「資訊高速公路」等方面的通信需求，制定相關的無線通信產品之通信機制與通信品質，以發揮暢通無阻的無線通信傳輸之最高效能，達到「產品零干擾與無污染」的境界。

電磁干擾防制技術無論國內或國外均僅在起步階段，因此於產品的設計製

造之初，必須先充分了解產品對相關電磁干擾問題規範的相關資料，並參考工作環境和電磁防制的需求規格等，以決定出電磁相容的工作環境，並在設計之前將電磁場對導線、導線對導線、電源供應電路/電力線/公用接地線間的交互作用，以及線路阻抗與運作頻率的匹配等干擾和影響的因素及程度，納入總體的設計考量，尋找可對應的策略方法。倘若再結合國內產官學研界的力量，積極投入相關技術與應用產品的研發，相信有機會與世界先進國家同步，甚至引領全球，其影響所及，不僅可解決國內電子產品產銷障礙，更可藉由有效的電磁干擾防制技術與體系的建構，增加國內電子產品的附加價值，進而提昇總體的技术層次與拓展應用範圍，增加國際的優質形象與國際的競爭力。

參考資料

1. 經濟部標準檢驗局，“商品電磁相容性管理辦法”。
2. 荒木庸夫，“電磁妨害的防止對策”，東京電機大學出版局，昭和55年。
3. Donald R. J. White, “Electromagnetic interference and compatibility”, Don White Consultants, Inc., Vol. 2(1980), Vol. 3(1986), Vol. 5(1972).
4. 電子技術期刊，“高頻電路之干擾改善專題”，電子技術雜誌出版社，165期，12月號，1999。
5. 廣慈資訊股份有限公司，“通訊寶典--(2)行動通信、(3)無線個人通信及(5)衛星通信”，廣慈資訊股份有限公司之通訊系列叢書。
6. 湖北省電磁兼容學會，“電磁兼容性原理及應用”，國防工業出版社，1996。