

# What's fun in EE

臺大電機系科普系列



## 漫談電磁學發展與天線科技

陳士元／臺大電機系教授

去年 6 月初，蘋果電腦公司推出新一代的智慧型手機 — iPhone 4，甫一推出便引起全球蘋果迷的搶購熱潮，甚至一度出現缺貨情形。然而，這款手機「獨特」的天線設計，導致收訊不穩定，也引起許多消費者不滿，直到蘋果公司同意提供「專用手機套」，以避免所謂「死亡之握」(Death grip) 的問題，這起喧騰一時的天線門 (Antenna-gate) 事件才得以平息。但事實上，天線問題本身並未因此獲得解決！此一事件更再次突顯天線在無線 3C 產品中所扮演的重要角色。

時值 21 世紀初，舉凡手機、筆電、數位電視、GPS 導航機、悠遊卡等早已是人們日常生活中不可或缺的電子產品，它們的共通特徵就是內建了『天線』。而要瞭解天線的基本原理，使得從電磁學的發展談起 …

### 一、從看似不相關的電學、磁學到電磁感應

其實人類很早就發現電和磁的存在：在古希臘時代，人們發現反覆摩擦琥珀便能吸附羽毛等輕巧物體，亦即現今眾所皆知的靜電現象，是故後來英文中「電」(electricity) 的字根便源自於希臘文的琥珀 (electron) 而來。在遠古時期的中國亦相傳早已知道利用天然磁石製成指南針來辨別方向。但直到 18 世紀末，科學家們才開始系統化地研究電磁現象。西元 1785 年，庫倫 (Charles-Augustin de Coulomb) 以實驗證實：兩個帶電粒子同性相斥，異性相吸，且受力大小與粒子間的距離平方成反比。西元 1819 年，厄斯特 (Hans Christian Oersted) 觀察到：通電的導線會使附近的磁針偏轉，這也是人類歷史上第一次使用非天然磁石產生磁場的實驗。隔年，安培 (Andre-Marie Ampere) 更透過實驗進一步證實：兩條平行導線上的電流若同向會產生吸力，反向則有斥力。厄斯特與安培兩人確立了電流產生磁場的說法。在此之前，人們一直認為電與磁兩者間並無任何關聯。



臺灣大學電機工程學系

10617 台北市 大安區 羅斯福路四段一號

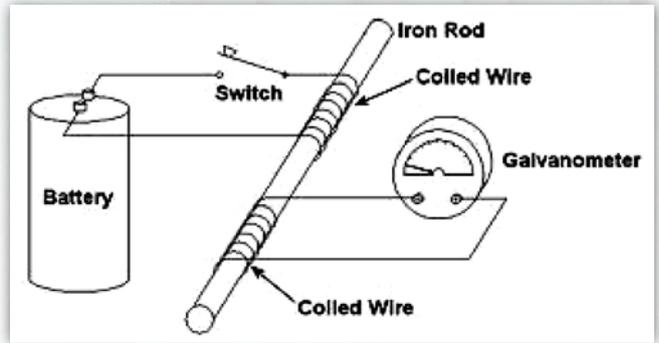
Email: dept@cc.ee.ntu.edu.tw

http://www.ee.ntu.edu.tw/





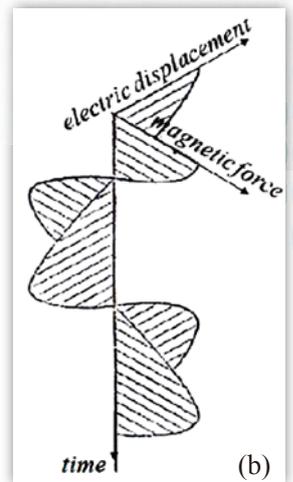
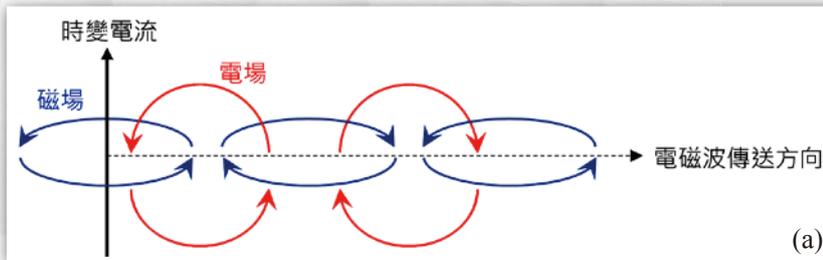
西元 1821 年，法拉第（Michael Faraday）應邀撰寫電磁學歷史概述一文，他於是開始大量閱讀相關的研究報告，同時發想：若電能生磁，那磁能否生電呢？他嘗試在一根棒狀軟鐵的左右兩端繞上線圈，左端線圈連接電池，右端線圈則連接電流計（如圖一），以觀察電流計指針的變化，未料指針竟動也不動。然而，法拉第並不因此感到氣餒，經過十年反覆的實驗觀察，西元 1831 年 9 月 23 日，他恍然大悟：電流計的指針雖然在實驗過程中靜止不動，但在每次實驗開始與結束的瞬間，指針都會稍微抖動一下，這代表只有在通過線圈的磁場隨時間改變下（即有「時變磁場」），才會產生感應電流，而如果不斷地改變磁場，就可以持續產生電流了！他立刻設計一個轉輪，將線圈與電流計固定在轉輪上，然後轉動轉輪使線圈通過磁鐵，過程中，電流計的指針持續抖動，代表法拉第已成功地將磁轉換成電。換言之，只要一個磁鐵加上一組線圈，就可以源源不絕地產生電流了。這是電磁學上一個跨時代的重大發現，人們便將 1831 年 9 月 23 日訂為『電機工業的誕生日』。



圖一 法拉第之電磁感應實驗示意圖（本圖片擷取自網路）

## 二、電學與磁學的集大成者 — 馬士威爾

西元 1864 年，年僅 34 歲的數學天才 — 馬士威爾（James Clerk Maxwell）將法拉第與前人的實驗結果歸納為數學式，提出了舉世聞名的馬士威爾方程式（Maxwell's equations）。就如同電荷或時變磁場均能產生電場一樣，他認為時變電場也應該能像電流般產生磁場，謂之「位移電流」（displacement current）。因此，時變電場會產生時變磁場，時變磁場又會產生時變電場，如此電生磁、磁生電，兩者循環相生形成波動，如圖二所示。而此一電磁波動即使在沒有粒子的真空中也可以傳送，且傳送速度就等於光速。

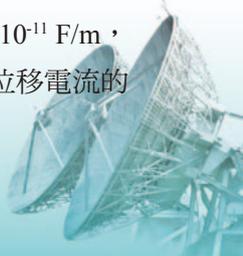


圖二 (a) 電磁相生而產生電磁波、(b) 馬士威爾所繪之示意圖

馬士威爾方程式完整地描述了電與磁之間的交互作用，也預測電磁波的存在，他不僅建構出一個完整的電磁理論系統，電學與磁學更因此進入大一統的時代。然而，這個電磁學上的重大突破，僅是馬士威爾憑藉其敏銳的觀察力與深厚的數學基礎，根據法拉第及前人的實驗結果推論而得，未經任何實驗具體驗證。更甚，年輕的馬士威爾尚且稱不上當代「博學鴻儒」之流，因此當時只有少數科學家相信他的理論，多數科學家仍持保留或反對意見。

## 三、與電磁波的第一次接觸

為了解決此一爭議，德國學者漢姆霍茲（Hermann von Helmholtz）於 1879 年向普魯士科學院建議設立柏林獎，以三年為期，凡以實驗證明或反證馬士威爾所提出之位移電流者，便可獲獎並得到 955 元馬克的獎金。但由於位移電流的大小與介電率（permittivity）及電場時變率之乘積成正比，而空氣中的介電率約等於  $10^{-11}$  F/m，因此除非電場隨時間變化極快（即變化頻率夠高），否則以當時實驗設備的精確度，實在難以量測到位移電流的存在。因此，三年的期限過去了，柏林獎得主依然高掛從缺。

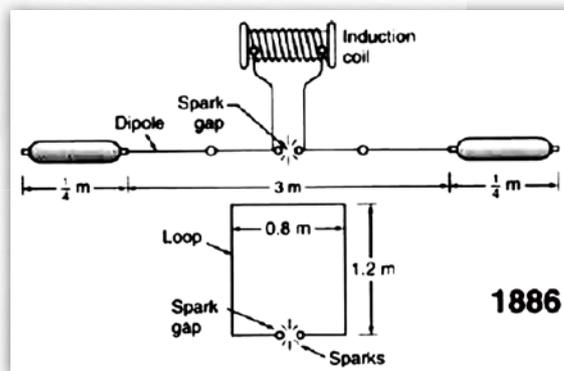




直到 1886-1888 年間，師承漢姆霍茲門下的赫茲（Heinrich Rudolf Hertz）發表了一系列論文，年僅三十歲的他，以實驗證明馬士威爾所預測的電磁波確實存在，其用以產生電磁波的裝置如圖三所示。他利用變壓器的原理，將感應線圈輸出端的兩端點分別連接至位於同一直線且距離很近的兩段導線上，形成發射器；同時，他又在發射器附近繞了一單圈矩形線圈作為接收器，線圈末端設有用以調整矩形線圈周長之裝置，並保留間隙。在赫茲的實驗中，他先將感應線圈的輸入端接上電源，此時在輸出端會產生瞬間直流高壓，由於兩段導線距離很近，高電壓會使導線間的空氣游離，因而產生火花放電，並激發導線輻射出電磁波。此時，只要適當地調整矩形線圈的周長，便可在矩形線圈末端的間隙看到火花。就這樣，赫茲『看』到了電磁波。上述實驗在電磁學史上是個相當重要的里程碑，因此後人便把計算電磁波動頻率的單位，以赫茲（Hz）為名，藉此表揚其卓越貢獻。

接著，赫茲又利用這套裝置進行了一系列的實驗，並逐一證實由馬士威爾方程式所演繹出的諸多現象，而他的實驗旋即也陸續被其他科學家重複驗證，至此，馬士威爾方程式終於在發表 20 餘年後全數獲得證實。

在圖三的實驗裝置中，赫茲利用感應線圈輸出端所接的兩段導線來輻射電磁波，堪稱是史上第一個發射天線，稱之為偶極天線（Dipole antenna），它可以有效地發射或接收電磁波中特定範圍內的頻率，一般而言，偶極天線的總長度約為該電磁波頻率下的半個波長，而作為接收用的單圈矩形線圈便是史上第一個接收天線，後人稱為迴路天線（Loop antenna）。時至今日，偶極天線與迴路天線仍是最常見的天線之一，其基本應用分別如圖四、五所示。



圖三 赫茲實驗裝置示意圖



圖四 偶極天線的應用 — 電視天線  
(本圖片擷取自網路)

#### 四、馬可尼的越洋通訊 — 無線通訊的濫觴

電磁波的傳送無遠弗屆，不受地形地物所限，而且電磁頻譜極寬，低頻有收音機的調幅（AM）電台  $10^5$ - $10^6$  Hz、數位電視  $\sim 10^8$  Hz、行動通訊  $\sim 10^9$  Hz、可見光  $\sim 10^{15}$  Hz、高至 X 射線  $\sim 10^{20}$  Hz，涵括了十幾個數量級，頻譜資源十分豐富。自從赫茲發明產生電磁波的裝置以來，電磁波便廣泛應用於通訊、廣播、遙測、資源探勘等諸多用途，其中尤以無線通訊為最大宗，並成為目前最熱門且影響民生最鉅的殺手級應用之一。

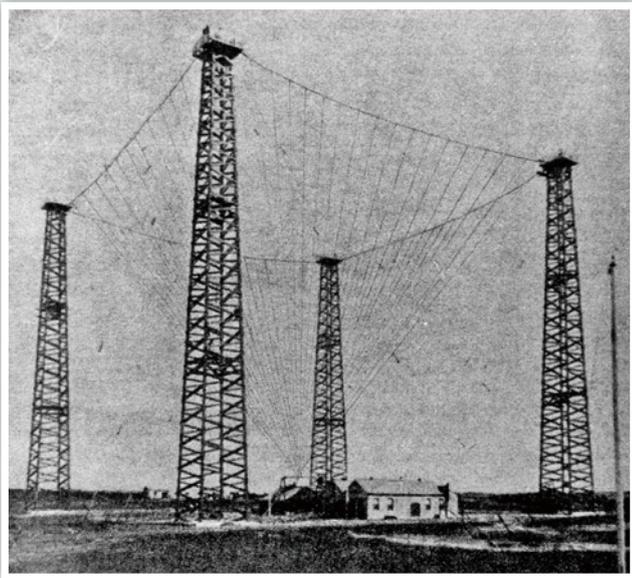
繼赫茲之後，陸續有人嘗試利用電磁波來傳送電報，但都無法成功地完成遠距離電報傳送。直到西元 1895 年，義大利的工程師馬可尼（Guglielmo Marconi）首開先河，將電報機連接類似赫茲的發射器放在船舶上，並在岸邊放置接收器。當船舶駛向大海直到視線所不及時，岸邊的接收器仍可持續收到來自船舶的電報訊號。馬可尼的實驗顯示：利用電磁波進行無線通訊可以不受地形限制。此實驗結果不僅轟動一時，更讓馬可尼預見無線通訊商機無限，遂集資成立無線電報公司，並持續精進通訊品質。

西元 1901 年 12 月 12 日，馬可尼為了更進一步證明電磁波無遠弗屆的威力，在英格蘭南端的波爾杜（Pol-du）架設了一個高功率的電報發射站，如圖六所示，他設計了一個倒角錐形的單極天線（Monopole antenna）作為發射天線，該天線由數十根導線所構成，並以地表為接地面。而在大西洋對岸的紐芬蘭（Newfoundland，現為加拿大領土），馬可尼則利用風箏架設一高達 152.4 公尺的接收天線。雖然該通訊系統的效果不甚穩定，卻是人類第一次得以跨越大西洋進行即時通訊，可謂開啟人類文明發展的新紀元，更是無線通訊的濫觴。



圖五 迴路天線的應用 — 手持式數位電視接收器  
(本圖片擷取自網路)





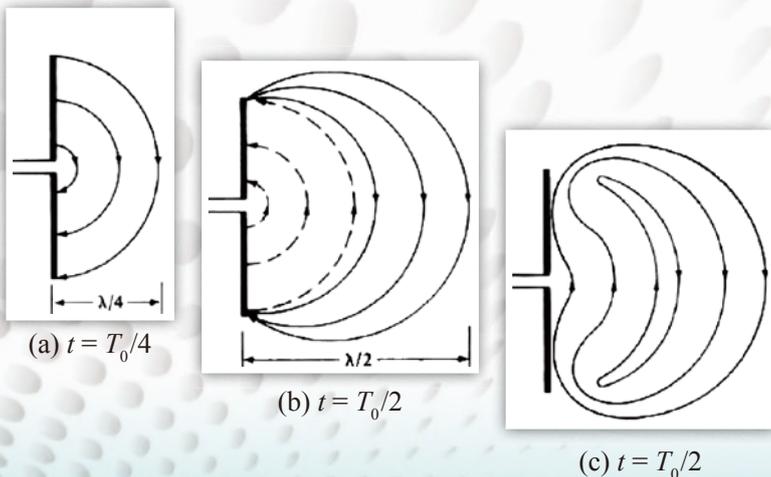
圖六 馬可尼所架設的大型發射天線（本圖片擷取自網路）

此後，馬可尼利用他所架設的電報收發站為歐洲大陸與北美洲之間提供無線電報服務，而為了改善電報系統的通訊品質，馬可尼也陸續設計出多款改良式天線。他這項不凡的成就受到舉世讚譽，不僅為他贏得「無線電之父」的美名，更因而獲得 1909 年諾貝爾獎的肯定。

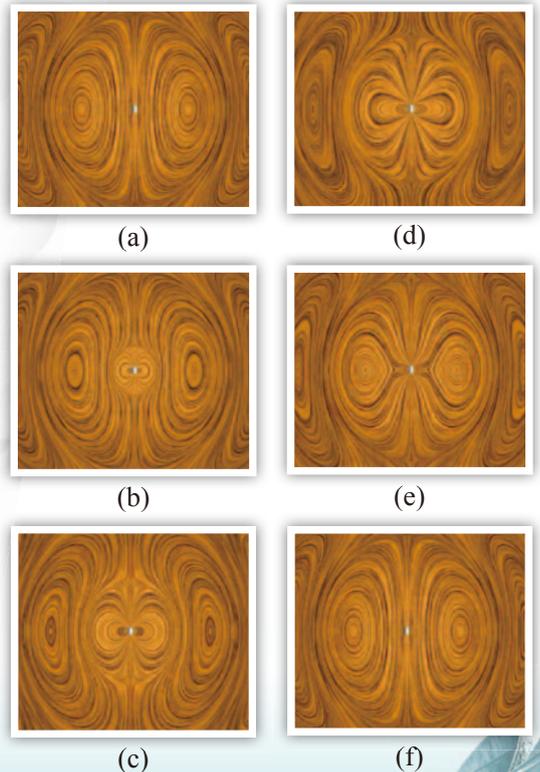
### 五、天線的基本輻射原理

談到天線，我們最感興趣的往往是：天線究竟如何輻射出電磁波？由於馬士威爾方程式牽涉到電磁場隨時間與空間的變化情形，過去只能以數學式表示，理解不易。而今，由於「數值電磁學」(Computational electromagnetics) 日趨成熟，加上電腦運算速度及多媒體顯示技術發展一日千里，我們已經可以在電腦螢幕上看到電磁場的變化，十足展現自然界的奧妙。

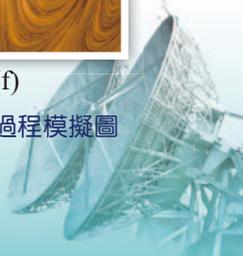
為了方便說明天線的輻射機制，在此以一根長度非常短的偶極天線為例，又可稱為赫茲偶極 (Hertzian dipole)。首先，將天線兩端點連接至一高頻訊號源，訊號源震盪頻率固定為  $f_0$ ，所對應之週期  $T_0 = 1/f_0$ 。從參考時間  $t = 0$  開始，訊號源分別對偶極天線的上下兩段導線充電。在  $t = T_0/4$  時，將有最大量的正、負電荷分別累積在偶極天線的上、下臂，此時天線附近的電力線分布如圖七 (a) 所示。接著，正、負電荷量開始減少，而這也表示：訊號源改以相反電性的電荷對偶極天線的上下臂充電，即提供負電荷給上臂、正電荷給下臂。直到  $t = T_0/2$  時，偶極天線上相反電性的電荷量也達最大值，此時電力線分布如圖七 (b) 所示。旋即，天線雙臂上所累積之正、負電荷彼此中和，使得雙臂上均無淨電荷，此時電力線必須離開天線，而兩組反向的電力線便會相互結合，形成一圈一圈的封閉迴路，稱為自由空間波 (Free-space wave)，如圖七 (c) 所示。在剩下的半個週期裡，前述步驟將會重複一次，但是電荷的電性及電力線方向相反，此時形成的自由空間波會將前半個週期所產生的自由空間波往外推送。此外，由於訊號源的震盪頻率為  $f_0$ ，整個過程將以  $f_0$  之頻率不斷重複進行，最後所造成的空間電力線分佈如圖八所示。值得注意的是：天線輻射的自由空間波即是電磁波，故空間中必同時存在電場與磁場，而為了簡化圖示，我們僅繪出電力線的部份。



圖七 赫茲偶極電力線之形成示意圖



圖八 赫茲偶極產生自由空間波之過程模擬圖





## 六、天線的重要參數

最常用來描述天線輻射特性的便是輻射場型 (Radiation pattern)。一般而言，輻射場型的量測方法為：將天線置於半徑為  $r_0$  的球心上 ( 假設  $r_0$  非常大 ) 並接上訊號源。此時，觀測者可在球表面不同位置量測輻射電場向量之分佈  $\vec{E}(r_0, \theta, \phi)$ 。由於觀測者離天線夠遠，輻射電場的大小與觀測距離成反比，電場向量分佈便可改寫成  $\vec{E}(r_0, \theta, \phi) = \frac{1}{r_0} \vec{f}(\theta, \phi)$ 。其中， $\vec{f}(\theta, \phi)$  即是該天線之輻射場型，代表輻射電場隨著觀測方位角的變化情形。須注意：電場向量  $\vec{f}(\theta, \phi)$  必與電磁波的前進方向 ( 即位置向量  $\vec{r}$  的方向 ) 垂直。

不同的天線可以有不同的場型，像前面介紹過的偶極天線，其輻射場型在與天線垂直的平面上有最大值，且在此平面上各個方向的輻射場大小都相同。這種天線就非常適合用於廣播用途，只要將天線架設在鐵塔或高樓上，則四周的用戶都可以收得到信號，如圖九所示。反之，像是點對點通訊、衛星通訊或雷達系統，這時最好能將天線輻射的能量集中在一個很小的方位角範圍內。由於輻射能量集中，儘管天線的總發射功率不變，目標範圍

內的輻射功率密度仍可大幅提高；同時，在其他的方位上，天線的輻射功率就非常小，不會造成無謂的電磁干擾。像下圖十中的碟形天線，其碟形面設計成拋物面的形狀，可以將絕大部分的能量集中在一個很小的方位角範圍內，大多應用在衛星通訊上。



← 圖九 電視廣播天線塔  
(本圖片擷取自網路)



→ 圖十 碟形天線  
(本圖片擷取自網路)

各種無線應用對於天線輻射場型的需求迥異。為了描述天線將輻射能量集中的能力，最常用的參數便是指向性  $D$  (Directivity)，其定義為：在相同輻射總功率下，天線的最大輻射功率密度與等方向性天線的輻射功率密度之比值 ( 註：等方向性天線為一理想之參考天線，它可將能量均勻地朝四面八方輻射出去 )。當天線的指向性越高，代表越能將輻射能量集中。因此，若天線的指向性  $D = 100$ ，表示該天線所產生的最大輻射功率密度為等方向性天線的 100 倍。一般將指向性  $D$  取以 10 為底的對數並乘上 10，且以 dB 值表示。如圖十中的碟形天線，其指向性  $D$  值通常高達 30 dB 以上，亦即在目標方向上的功率密度是等方向性天線的 1000 倍，訊號便得以傳送到更遠的地方。

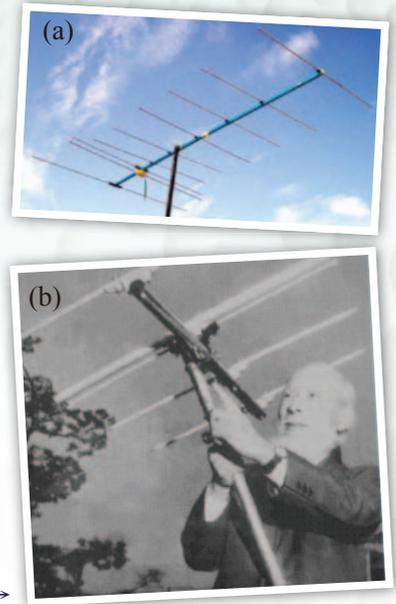
除了輻射特性之外，天線也必須跟發射或接收電路互相配合，才能順利地將電磁波發射出去或接收進來。因此，天線的另一個重要的參數是輸入阻抗 (Input impedance)，它代表的是在天線連接電路的端點處之電壓與電流比值。換言之，當有 1 安培的交流電流流入天線時，該天線饋入端點的電壓值即等於輸入阻抗。只有當天線的輸入阻抗與電路的阻抗相互匹配時，天線才能有效發揮其功能，否則大部份的能量會反射回電路中，如果是發射機的話，反射能量甚至會把發射機的電路燒壞。



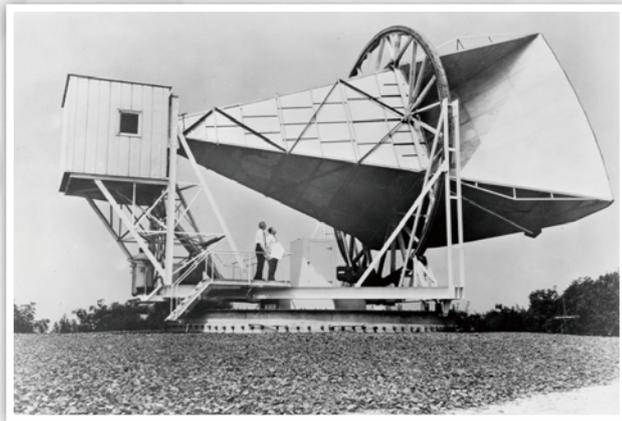


## 七、發展近況與未來展望

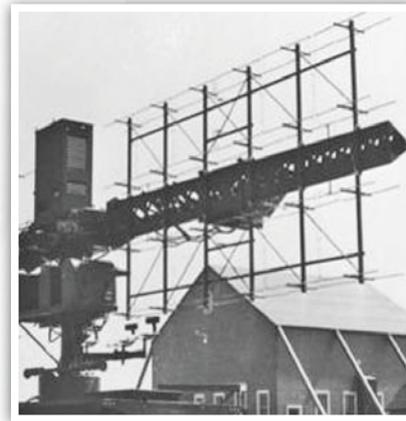
自馬可尼的越洋通訊實驗後至西元 1940 年間，天線領域的發展重心在於以金屬導線製成的各式天線設計。其中，最著名的莫過於八木 — 宇田天線 (Yagi-Uda antenna)，即俗稱的魚骨天線，如圖十一所示。此天線是由八木秀次和宇田新太郎於西元 1926 年所共同發明的，後來多用於接收傳統無線電視台的訊號。接著，在第二次世界大戰期間，天線科技發展一日千里。納粹德軍以閃電戰征服西歐之後，開始對英國各主要城市進行密集的空襲轟炸，英國皇家空軍為了預警德軍的空襲，遂與美國合力開發出雷達系統。而雷達偵測須有高指向性天線的配合，才能精準地定位與測距，並達到預警效果。因此，各種新型天線設計陸續出爐，如：號角天線 (圖十二)、陣列天線 (圖十三)、波導管開槽天線 (圖十四)、碟形天線等。



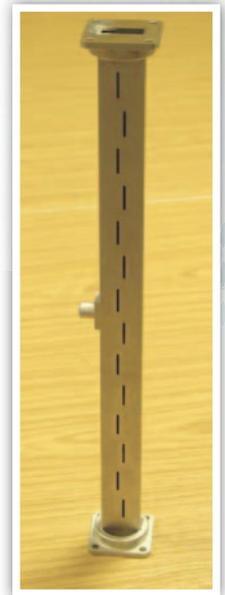
圖十一 (a) 八木 — 宇田天線、(b) 八木秀次與天線之合照 (本圖片擷取自網路) →



圖十二 用於衛星通訊之號角天線 (本圖片擷取自網路)

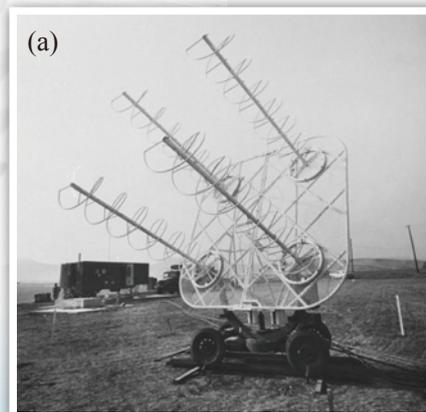


圖十三 應用於雷達系統之陣列天線 (本圖片擷取自網路)



圖十四 波導管開槽陣列天線 (本圖片擷取自網路)

戰後，克勞斯 (John D. Kraus) 發明了螺旋型天線 (Helical antenna)，如圖十五 (a) 所示。該天線可依需求的不同設計成兩種形式：其一具有較大的天線尺寸但極佳的指向性；其二則是指向性低，但天線尺寸大幅縮小。前者在 1980 年代應用於全球定位系統 (Global Positioning System，簡稱 GPS) 的 24 顆衛星上；後者則成為 1990 年代手機天線的主流設計，如圖十五 (b)。



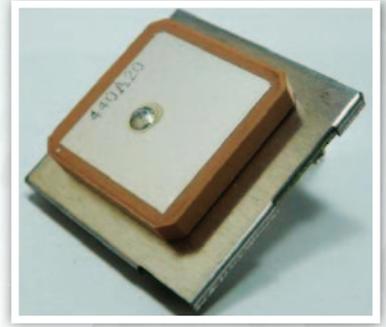
圖十五 (a) 由四個螺旋形天線所組成的陣列、  
(b) 早期手機上的突起物便是螺旋形天線 (本圖片擷取自網路)





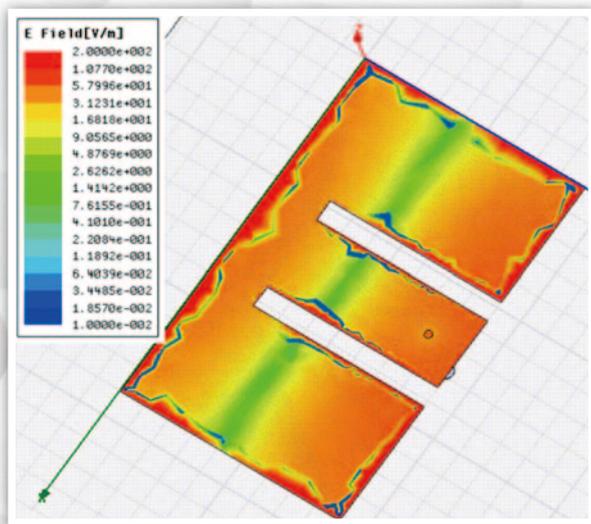
到了 1970 年代，隨著印刷電路板（Printed Circuit Board，簡稱 PCB）技術發展日益成熟，且無線裝置講求輕薄短小的大勢所趨，平面印刷式天線也開始備受重視。其中，最重要的便是微帶天線（Microstrip antenna），如圖十六所示。由於微帶天線可直接貼附於物體表面而不佔空間，被廣泛應用於 GPS 導航機、飛機、太空船、衛星，甚至是愛國者飛彈上。

圖十六 GPS 接收模組，白色矩形部份為微帶天線  
（本圖片擷取自網路）



儘管第二次世界大戰促使天線科技蓬勃發展，西元 1960 ~ 1980 年間電腦科學的進步對於近代天線工程的影響卻更為深遠。在這之前，天線工程至多算是一門「實驗電磁學」，只能透過實作量測加以驗證，勞民傷財且極度不環保。但從 1960 年代開始，研究人員結合天線分析與數值方法，並利用電腦運算設計出各種複雜的天線結構，且能準確地預測其工作效能。同時，研究人員也發展出漸近方法（Asymptotic methods），用以分析超大型的天線系統。

而台灣在「數值電磁學」的發展上也扮演了非常關鍵的角色。1980 年代初期，台灣大學電機系的陳俊雄教授帶領他的弟子連存德、江衍偉、鄭士康、吳瑞北、李金發、鍾世忠等人，發展出變分電磁學的理論，將有限元素法（Finite element method）應用於電磁計算上，可用來分析任意結構與不同材質對電磁波的影響。之後，李金發負笈美國，在惠普（HP）公司的大力支持下，與指導教授桑德斯（Zoltan Cendes）發展出視覺化介面，並於 1990 年代中期完成了 HFSS 軟體。這是一套效能強大的電磁分析工具，現在許多元件或模組的電磁設計都得靠它，也因此帶動電機電子領域的蓬勃發展。



圖十七 微帶天線上電場分佈模擬圖

進入 21 世紀之後，已有許多免費或市售的電腦輔助設計（Computer-Aided Design，簡稱 CAD）軟體可以幫助我們分析及設計任何複雜的天線，且模擬結果十分準確。更重要的是，透過 CAD 軟體的視覺化介面（如圖十七），使用者可以更深入瞭解天線的基本電磁特性，藉以精進初始設計。

有了上述這些強而有力的分析工具輔助，天線科技近年來的發展相當廣泛且多元。過去僅單純以新型態或新發明的天線架構為主，如今研究範圍更擴及：智慧型天線系統（Smart antenna system）、相位陣列（Phased array）、光學天線（Optical antenna）、無線傳能（Wireless power）、超穎材料（Metamaterial）、射頻辨識系統（Radio-Frequency Identification，簡稱 RFID）、近場通訊（Near Field Communication，簡稱 NFC）、天線微小化技術（Antenna miniaturization）、晶片天線（Antenna on chip）等領域。而隨著更多創新應用的問世，天線領域刻正面臨嶄新的課題與挑戰，我們期待後起之秀能為這個發展已逾百年卻又歷久彌新的『新』科技注入活水。

