



■文：編輯部

從物理學角度，可見光區域只是電磁波頻譜中一小段電磁波（光同時還有粒子特性）。假設我們的肉眼能夠像感知光線那樣，能夠察覺到無線電波通信頻率的信號，那麼我們眼中的無線通訊將會是一個異彩紛呈的世界。

根據 $C = \lambda f$ 這個簡單的物理學公式，人們按照頻率將無線通訊劃分出若干區域，並隨著科技的發展，將這些頻帶逐一運用起來，構

成了今天的豐富多彩的無線通訊應用。

從公式可以看出，波長（ λ ）和頻率（ f ）呈反比關係，即波長越長頻率越低。而且還有一個鮮明的特性，波長越長的電磁波，越障能力越強，比如我們日常使用的 2.4G 的 WiFi，在相同功率下，其越障能力比 5G 頻段的 WiFi 強。

無線電波信號頻率是客觀存在的物理量，同土地、水、森林一

樣也是各國政府掌控的寶貴自燃資源。ITU 的《無線電條例》(RR/Radio Regulations) 中定義了約 40 種無線電通信服務。在某些情況下，部分無線電頻率被出售或許可給私人無線電傳輸服務運營商（例如，電信運營商或廣播電視臺）。

某些商用頻帶無線頻率非常珍貴，價格不菲，價格動輒數億美元。

根據國際電信聯盟 (ITU) 定義，目前人類可以識別使用的電磁波頻率範圍從 3kHz~3000GHz。為了方便表述，3kHz~300GHz 的頻帶根據頻率高低被分成了

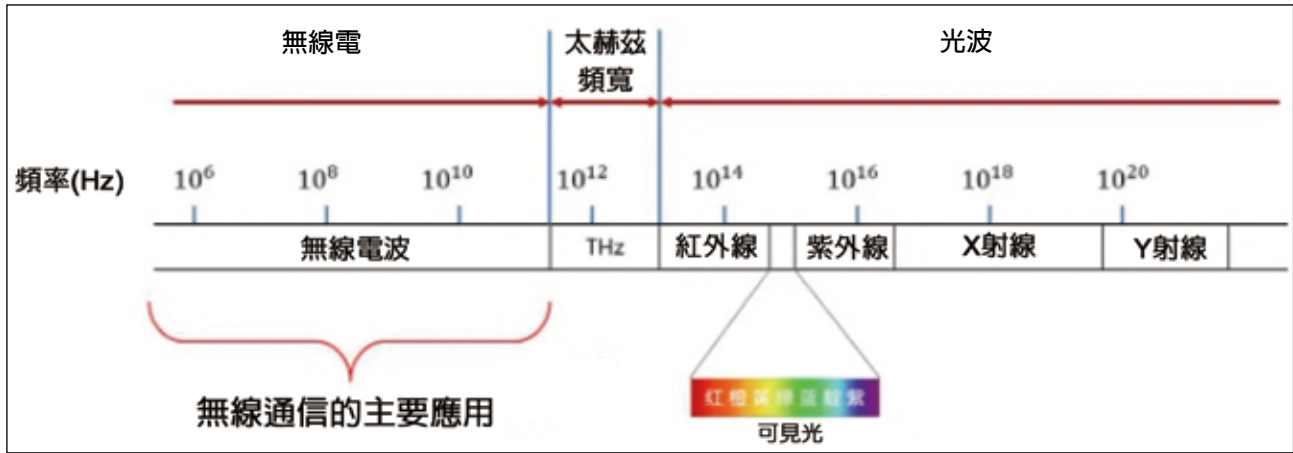
注¹：C=λf 公式簡介

C：光傳播速度，根據物理定義，光在真空中的傳播速度為 30 萬公里 / 秒，即 3×10^8 m / 秒

λ ：波長，光波在一個週期傳播的距離

f：頻率，光波震動的頻率。單位是赫茲 (Hz)，1Hz=1 次 / 秒，1MHz=100 萬次 / 秒
電磁波在空氣中的傳播略小於真空中的光速，但通常仍以真空中的光速來簡化計算

圖說：無線電波頻譜資源示意圖



VLH (甚低頻 3-30KHz)、LF (低頻 30-300KHz)、MF(中頻 30-3000KHz)、HF(高頻 3-30MHz)、VHF (甚高頻 30-300MHz)、UHF(超高頻 300-3000MHz)、SHF(超高頻 3-30GHz)、EHF (極高頻 30-300GHz) 和 THF (太赫茲 300-3000GHz) 共 9 個部分，低於 3kHz 的頻帶另備劃分為 5 個，因此無線電頻率目前為止共劃分為 14 個頻帶。之所以用“3”來劃分，是因為光速等於 3×10^8 米 / 秒，方便計算其他參數。

根據地區不同，ITU 將全球分為三個區域，ITU1 區，美洲為主；ITU2 區，亞洲大洋洲為主；ITU3 區，歐洲和非洲等。

順便提一句：國際電信聯盟 (ITU: International Telecommunication Union) 的前身是 1865 年 20 多個歐洲國家共同成立的“國際電報聯盟”，其中一項重要工作就是負責協調無線電頻率資源，防止出現混亂。1934 年“國際電報聯盟”改名為國際電信聯盟就是今天的 ITU，第二次世

界大戰之後，隨著聯合國的成立，ITU 正式成為聯合十多個機構中的一個，也是其中最古老的機構，沒有之一。

無線頻率應用簡介

VLF (3KHz~300KHz) 頻帶：這一頻帶的波長能達到數十公里，具有非常好的越障能力和傳播距離，可以輕易覆蓋整地球表面，最初就被用於航空、航海的導航。眾多民航客機、輪船都通過 VLF 頻帶進行導航和管理，在這個頻帶上還有潛艇使用的聲納系統等。

時下流行的電波鐘，也是這一頻段，中國對時電波 BPC 的 68.5KHz 頻率、日本對時電波 JJY 40KHz/60KHz 頻率、北美地區對時電波 WWVB 60KHz 頻率、歐洲對時電波 MSF/DCF77 60KHz、77.5KHz 頻率共 6 個電波對時信號發射局，被稱作 6 局電波。

中頻 MF (300KHz~3MHz)：廣播電臺與無線電導航，也是人類早期廣播電臺選用的頻帶，通過與音訊信號的疊加，可以很好的將聲

音傳播出去，此外同樣也是民航導航系統的頻率，在沒有 GPS 的時代，普遍採用 NDB 定位和導航。

高頻 HF (3MHz~30MHz)：隨著無線電通信技術和軍事技術的發展，人類發現在更高頻帶的短波段，借助電離層反射，可以將信號傳遞到非常遠的地方，而無需巨大的發射功率。短波通信將無線通訊延伸到地球的各個地方。早期的無線電愛好者也喜歡在這個頻帶交流，至今仍有很多開放頻段的私人電臺在這一頻段工作。

另外，我們熟知的 RFID (物流跟蹤)、NFC (常見於交通卡) 也在這個頻段工作。其中 NFC 工作在 13.56MHz，而 RFID 額外使用 27.12MHz，採用這一頻段主要考慮的是設計成本和難度而非傳輸距離。

VHF 甚高頻 (30MHz-300MHz)：與無線電廣播一樣，既然能夠將音訊信號進行廣播，那麼視訊信號也可以依此類推。差別就是電波中承載的內容更多。VHF 甚高頻帶被開發和利用起來。電視信

號、FM 廣播、對講機、BP 機、無線電話 (早期的大哥大) 紛紛出現，讓無線通訊大放異彩，隨著電視進入千家萬戶，移動通信的出現，人類社會也發生了巨大的變化，為數字世界的到來打下了基礎。

VHF 還有國際海事通訊、航空導航、航空地面 ATC 通訊等應用。

UHF 特高頻 (300MHz~3GHz): 電子資訊技術的發展，手機大量普及，從功能機到智慧手機。2G,3G,4G 通信逐漸來到人們身邊，從時事通話到時事視頻，通信技術不斷拉近著人與人之間的距離。

今天的絕大部分數位無線通訊技術，都在這一區間內。由於應用密集，因此世界各國都採取了授權形式嚴格規範使用。手機數據機的作用，就是對不同授權頻帶、不同授權網路制式進行支援。方便用戶在全球各地使用手機。

以 WiFi 為例，由於 WiFi 使用了非授權頻帶，因此，這一頻帶的擁擠程度非常高，相互之間的干擾頻繁，因此，從 802.11n 開始，WiFi 聯盟就開闢了 5G 非授權頻帶來避開干擾問題。

EHF 極高頻 (30~300GHz): 這一頻帶的應用也開始豐富起來，隨著電磁波頻率的提升，這一頻帶的波長進入毫米級別。常說的毫米波通信就是在這一頻段。在 WiFi 應用中，為了進一步提升傳輸頻率，新一代 WiFi 標準 802.11ad 直接選用了 60GHz 頻帶。在 802.11ad 之前，Wireless

HDMI 標準通過 60GHz 頻帶實現了 HDMI 信號 10 m 內的無線傳輸，被蘋果再一次推上熱點的 UWB (超寬頻) 也同樣在極高頻下。下一代超過 10Gbps 的無線通訊，將會在 EHF 頻帶出現。

THF 太赫茲 (300GHz~3THz): 這頻帶能夠實現 100Gbps 以上的通信速度，是 6G 以及未來通信的主要研究領域，此外，由於太赫茲電磁波接近了可見光區域，因此還能具備一定的感知能力，因此在這一頻帶，將是感知和通信一體化的新階段，等待更多科技人員去探索。

通信需求驅動無線技術進步

巴特爾定律 (Butter's Law) 說：從一根光纖中匯出的資料量，每 9 個月就會翻一倍，這也意味著在光纖網路中，資料傳輸成本每 9 個月的時間就會下降一半。

這反映出了海量資料需求和資

料傳輸成本之間的“惡劣”關係，科技人員需要絞盡腦汁找到平衡點。

Edholm 頻寬定律 (Edholm's Law of Bandwidth) 則指出：人們對於無線短距離通信的頻寬需求基本每隔 18 個月翻一番。為了滿足不斷增長的頻寬需求，設計人員或採用更先進的調製技術提高頻帶利用率，或通過採用多種複用方式來增加通道容量。這是無線頻率資源在被不斷開發利用和優化的寫照。大量通信技術和標準在這樣的需求下誕生和使用。

從傳輸速率和傳輸距離這張二維圖示可以看出，除了運營商主導的移動通信之外，隨著應用的不斷細分，適用於不同場合的傳輸技術在各自領域發揮作用，除了為人們提供更多類型的無線通訊服務，還在為機器之間提供通信能力，比如在 LPWAN 這個框圖中的通信技術，主要是為 IoT 應用提供長距離通信服務，所有這些技術都在幫助人類構建出更加智慧的生活。CTA

圖說：主流無線通訊傳輸速率和傳輸距離示意

