

5G 通訊技術到底是什麼？

1.0 通訊簡介



圖 1.由左至右分別為：1G (1983)、2G (1991)、3G (2001)、4G(2009)、5G(2019)系統的手機
(圖片摘自 wiki、手機王)

我們要把一個電子位元，例如 01010....等資料，從高雄市傳送到台北市，工程技術上必須使用兩個電磁波，一個是以正弦波形式存在的載波(Carrier wave)，另一個則是以位元形式存在資料串(Data)，而且載波的頻率必須遠高於資料串的頻率，見圖 2 ~圖 4。我們透過手機內的晶片把資料串調變在載波上，這個被資料串調變後的載波，藉由手機的天線把訊號通過廣闊的天空傳送到高雄市的基地台，高雄市的基地台再透過地下光纖網路，沿著台鐵的鐵軌北上，把資料串傳送到台北市的基地台，台北市的基地台透過廣闊的天空把資料傳送到另一支手機，這就是通訊的基本架構。載波就如同一台高鐵列車，而資料串則如同旅客，旅客(資料)搭上高鐵列車(載波)，高鐵列車把旅客載送到台北。

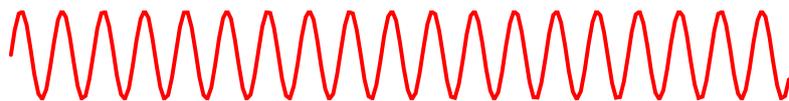


圖 2.正弦波形式存在的載波

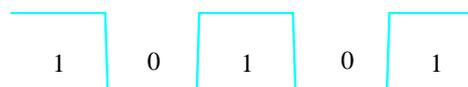


圖 3. 以位元形式存在資料串

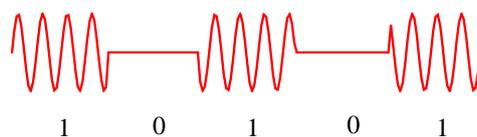


圖 4. 被資料串調變後的載波

按電磁波的理论 $C=f \cdot \lambda$ ，其中 $C=3 \times 10^8$ m/sec 是光速， f 是電磁波的頻率， λ 是電磁波的波長。電磁波的正弦波形，會同時隨時間與空間改變震盪形狀，並以接近光速的速度往前傳播。頻率 f 是指電磁波在一秒內完整震盪次數，震盪次數越多代表頻率越高。 λ 則是電磁波在空間上一個完整震盪的長度， f 與 λ 恰巧成反比， f 越高 λ 則越短。按通訊技術我們知道如果 f 越高，則每秒調變在載波上的資料串就可以越多。所以 1983 年第一代行動通訊(1G)系統的載波頻率 f 是 100000000 赫茲(八個零)，而 2020 年第五代行動通訊(5G)系統的載波頻率 f 會是 10000000000 赫茲(十個零)，這意味 5G 系統的載波頻率整整比 1G 系統的載波頻率，足足提升了一百倍。

名稱	電磁波頻率(載波頻率)	啟用年	資料傳輸量
第一代行動通訊，1G (1st Generation)	150 MHz (1.5×10^8 Hz)	1983	類比式行動電話系統。
第二代行動通訊，2G (2nd Generation)	450 MHz (4.5×10^8 Hz)	1991	數位系統，語音+文字簡訊。 靜止資料傳輸速度 40Kbps (4.0×10^4 bits/sec)
第三代行動通訊，3G (3rd Generation)	1900 MHz (1.9×10^9 Hz)	2001	數位系統，語音+圖片。 移動資料傳輸速度 144 Kbps (1.44×10^5 bits/sec) 靜止資料傳輸速度 2 Mbps (2.0×10^6 bits/sec)
第四代行動通訊，4G (4th Generation)	2600 MHz (2.6×10^9 Hz)	2009	數位系統，語音+影片。 資料傳輸速度：1000 Mb (1.0×10^9 bits/sec)
第五代行動通訊，5G (5th Generation)	28 GHz (2.8×10^{10} Hz)	2020	數位系統，語音+影片+物聯網。 資料傳輸速度：20 Gbps (2.0×10^{10} bits/sec)

表 1. 從 1G 到 5G 的技術參數

2.0 天線技術

載波頻率 f 越高，可以攜帶的資料量越大，但是頻率高的電磁波其波長必然很短，短波長的電磁波容易被建築物阻擋，而長波長的電磁波則可以透過繞射原理，繞過建築物繼續前進，這也

是為什麼無線通訊的手機使用頻率 10000000000 赫茲(十個零)的電磁波作為載波，而有線光纖通訊則使用頻率 100000000000000 赫茲(十四個零)的電磁波作為載波。

手機就如同轎車一次只能搭載四個人，而光纖就如同同一組高鐵列車一次可以搭載四百人。同一時間，有一百台轎車分別從高雄市各個角落把旅客集中到高鐵站來，然後改搭高鐵一起出發前往台北。這就如同一百支手機的資料串同時被高雄市的基地台接收彙整後，再以光波的形式透過光纖傳送至台北。

按天線的理論：

$$P_{rx} = \frac{P_{tx}}{4\pi R^2} \frac{\lambda^2}{4\pi} G_{rx} G_{tx}$$

其中

P_{rx} = 接收機，接受來自天線收到電磁波訊號功率

P_{tx} = 發射機發射的電磁波訊號功率

R = 電磁波訊號傳播距離(電磁波輻射半徑)

λ = 電磁波訊號波長

G_{rx} = 接收機天線的訊號增益

G_{tx} = 發射機天線的訊號增益

天線的長度與電磁波的波長必須成正比，如此天線才能順利向四面八方輻射。從上面的討論我們可以清楚瞭解，5G 系統的天線接收到的電磁能量很低，而且天線的長度很短。為了克服這個問題，5G 的天線必須是陣列(Array)而不是單一根的天線，這種陣列天線與美國神盾級驅逐艦上的雷達，或戰鬥機 F-16V 上的雷達是類似的原理。

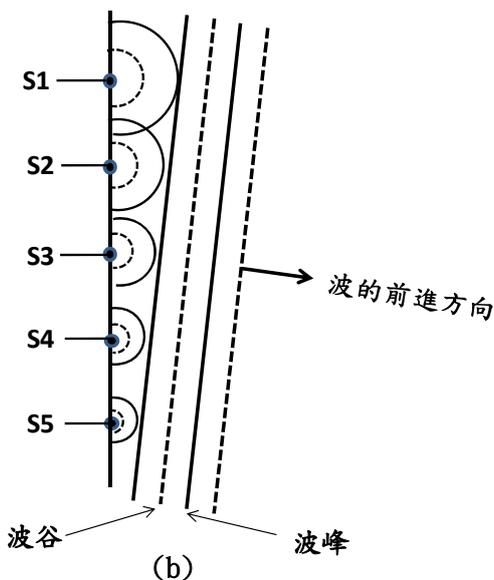


圖 5. 陣列天線的原理圖



6. 5G 系統的天線原理與神盾艦的相位雷達類似 (圖片摘自 Navy Technology)

這種陣列天線的原理是透過每個小天線單元，見圖 5，其電磁波發射時的個別相位延遲來達到改變角度甚至於聚焦電磁波的目的。5G 系統採用陣列天線的技術我們稱之為多波束天線技術（Multiple beam antenna）及多輸入多輸出天線技術（Massive multi-input multi-output antenna; 簡稱 MIMO）

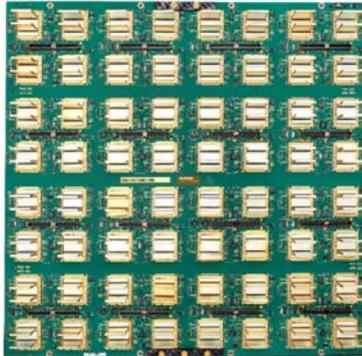


圖 7. 5G 手機內部的微小陣列天線（圖片摘自 Phased Array Antennas & The Roadmap to 5G Wireless）

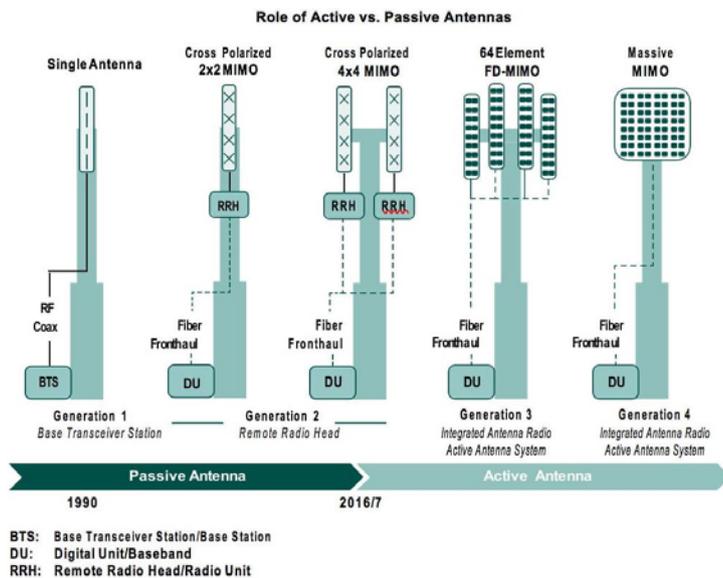


圖 8. 手機基地台的天線演進（圖片摘自 Antennas: A critical element in your 5G network）

3.0 基地台技術

固定在地球上某一個定點上空的人造衛星，我們稱為同步衛星，這種衛星公轉的速率與地球自轉的速率相同，軌道半徑大約 36000 公里。5G 的基地台有兩種架構，一種是佈署在人口稠密的都市，例如在建築物的頂端架設大型天線，而地面基地台之間則以光纖串起網路，目前 4G 系統就是採用這種架構。另一種 5G 架構則是採用低軌道非同步衛星，這種低軌道衛星的軌道半徑大約 1200 公里，衛星繞地球一圈大概 100 分鐘。未來因為 5G 系統支援物聯網及汽車自動駕駛，因此像北美這樣國土廣大但是人口相對分散的地區比較適合採用低軌道衛星架構做為 5G 的基地台

系統，未來幾年內美國預計將發射至少兩萬顆低軌道衛星作為 5G 的基地台。



圖 9. 5G 之高通量通信衛星將形一個包圍地球的綿密太空網路
(圖片摘自 LeoSat plans 5G-ready low latency satellite network for 2019 launch)

這種低軌道 5G 通訊用的衛星，我們稱為”高通量通信衛星(High throughput satellites; 簡稱 HTS)””，這種衛星因為使用陣列天線，因此可以彈性控制電磁波的方向與波束的直徑大小，以下我們以一個例子來說明：傳統的高軌道同步衛星無法控制電磁波的波束直徑大小，因此衛星的訊號會散佈在一個很廣大的地面區域，見圖 10，假設地面有四個基地台，每個基地台被分配到的頻道波長分別是： λ_1 對應 1 號基地台... λ_4 對應 4 號基地台，每個基地台都會接收全部的電磁波訊號包含 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 λ_4 四個波長，但只有屬於這個基地台指定波長的訊號才會被這個基地台的接收機下載，其他非指定波長的訊號則會被這個基地台忽略，例如 1 號基地台被指定的頻道波長是 λ_1 ，雖然 1 號基地台的天線會接收到由衛星所發射的全部電磁波(λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 λ_4)，但只有 λ_1 的訊號會被 1 號基地台處理，其他波長的訊號都會被 1 號基地台忽略，換言之，為了避免混淆，每個地面基地台其實只有一個被指定的頻道波長可供使用。

但是若改為使用 5G 之高通量通信衛星，見圖 11，因為這種衛星可以控制電磁波的方向與波束的直徑大小，所以每個地面基地台都可以有 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 λ_4 四個頻道波長可供使用，擁有比較多的頻道這也正是為什麼 5G 的速度可以比傳統架構快很多的原因。而這數萬顆的高通量通信衛星，在低軌道上將形一個包圍地球的綿密太空網路。

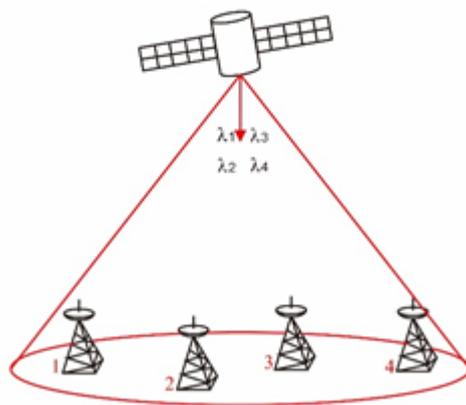


圖 10. 傳統高軌道同步衛星，一個基地台只有一個頻道可供使用

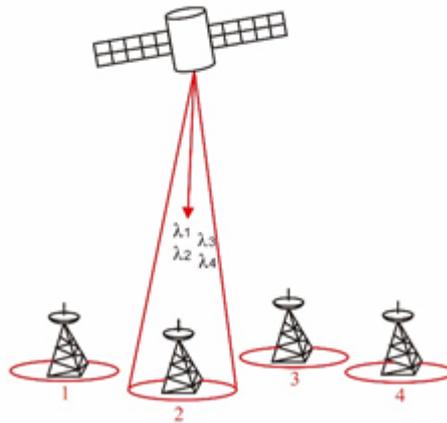


圖 11. 低軌道 5G 之高通量通信衛星，每個基地台都有四個頻道可供使用

中國大陸因為人口稠密，所以中國力推的 5G 系統將會是以大量地面基地台，透過地下光纖網路連接為主，少量太空衛星為輔的架構。而美國恰恰剛好相反，美國地廣人稀，所以美國的 5G 架構將會是以衛星為主，少量地下光纖為輔的架構。

4.0 5G 通訊技術的應用

未來的生活，例如我們家裡的冰箱會裝置很多感應器及鏡頭，用來監控冰箱內的水果有那些款？鮮奶還剩多少？並把這些相關資訊傳送到家裡的電子管家系統，這樣的技術我們稱為“物聯網”。而這些從家中的冰箱、冷氣機、濕度計、甚至於主人的消費紀錄...等等，所收集來的巨量數據，這樣的技術就是“大數據”。電子管家系統透過分析這些巨量數據並協助主人下單買水果、買牛奶、訂餐廳...，這樣的技術我們稱為“人工智慧”。未來，我們開車上路後，汽車可以透過衛星導引路線，車況影像更可以透過人工智慧系統，判別危險並排除危險，這樣的技術就是“自動駕駛”。而串聯這些先進應用的通訊網路正是本文所介紹的 5G 通訊網路。



圖 12. 汽車自動駕駛系統

(圖片摘自 In a crash, should self-driving cars save passengers or pedestrians? 2 million people weigh in)